



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STUDIUM VLASTNOSTÍ LASEROVÝCH SVARŮ
MATERIÁLU DOMEX 460 MC PŘI VYUŽITÍ
OBLOUKOVÉHO PŘEDEHŘEVU**

STUDY OF PROPERTIES OF LASER WELDS OF DOMEX 460 MC MATERIAL USING ARC PREHEATING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Michal Novotný**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Studium vlastností laserových svarů materiálu Domex 460 MC při využití obloukového přehřevu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést analýzu vlivu obloukového přehřevu při laserovém svařování pevnostní jemnozrnné oceli Domex 460MC. Vzniklé tupé svary testovat z hlediska mechanických vlastností, svarových vad. Provést technicko–ekonomické zhodnocení této technologie.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii laserového svařování.
Osvojit si problematiku svařování ocelí s vyšším uhlíkovým ekvivalentem, včetně možných technik přehřevu.
Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu. Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.
Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

Seznam doporučené literatury:

BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technológie. 1. vyd. Bratislava: STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.

DULEY, Walter W. Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-47-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E. Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-857-7181-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

NOVOTNÝ Michal: Studium vlastností laserových svarů materiálu Domex 460 MC při využití obloukového přehřevu.

Práce se zabývá svařitelností materiálu Domex 460 MC. Budou zkoumány dvě metody svařování a tři další materiály v heterogenním svaru. Výše zmíněné metody jsou laserové svařování pevnolátkovým laserem a nová metoda laser – TIG. Dalšími materiály vstupujícími do procesu sváření jsou Domex 700 MC, S355J2 a DC01. Domex 460 MC je vysokopevnostní ocel s jemnozrnnou strukturou. Vneseným teplem v průběhu svařování dochází ke snižování mechanických vlastností v důsledku růstu zrn. Ze svařených materiálů byly zhotoveny metalografické výbrusy, které byly následně podrobeny rozboru makrostruktury a mikrostruktury, mikrotvrdosti a rozložení Mn ve svařovaných heterogenních vzorcích na elektronovém mikroskopu za pomoci EDX analýzy.

Klíčová slova: Laser, Laser – TIG, svařování, vysokopevnostní ocel

ABSTRACT

NOVOTNÝ Michal: Study of properties of laser welds of Domex 460 MC material using arc preheating.

This diploma thesis deals with weldability of Domex 460 MC material. There are two welding methods and three other welded materials in heterogenous connection which will be researched in this diploma thesis. The welding methods are fiber solid-state laser and a new method of hybrid welding called laser – TIG. The other materials are Domex 700 MC, S355J2 and DC01. Domex 460 MC is a high-strength steel with fine-grained structure. During the welding process the input heat decreases mechanical properties of the materials. This effect is caused by material seeds growing. From these samples (which were produced by welding) were created metallographic cuts. These metallographic cuts were analysed focusing on their macrostructure, microstructure, microhardness and Mn arrangement in welded heterogenous samples using electron microscope and EDX analysis.

Keywords: Laser, Laser – TIG, welding, high strength steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOVOTNÝ, Michal. *Studium vlastností laserových svarů materiálu Domex 460 MC při využití obloukového předehřevu* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113121>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V dne 24.5.2019

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky, vedení a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Mgr. Haně Šebestové, Ph.D. za pomoc při rozboru mikrostruktury, panu Ing. Petru Horníkovi za svaření vzorků, panu Ing. Jakubu Kolářovi, Ph.D. a společnosti TESCAN za pomoc při analýze vzorků elektronovým mikroskopem. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a mé přítelkyni Barboře Rosochové, která mi byla oporou v průběhu celého studia.

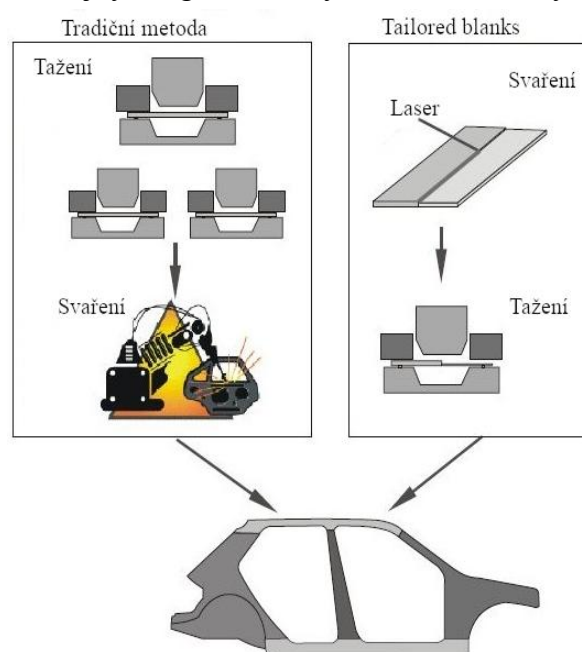
OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

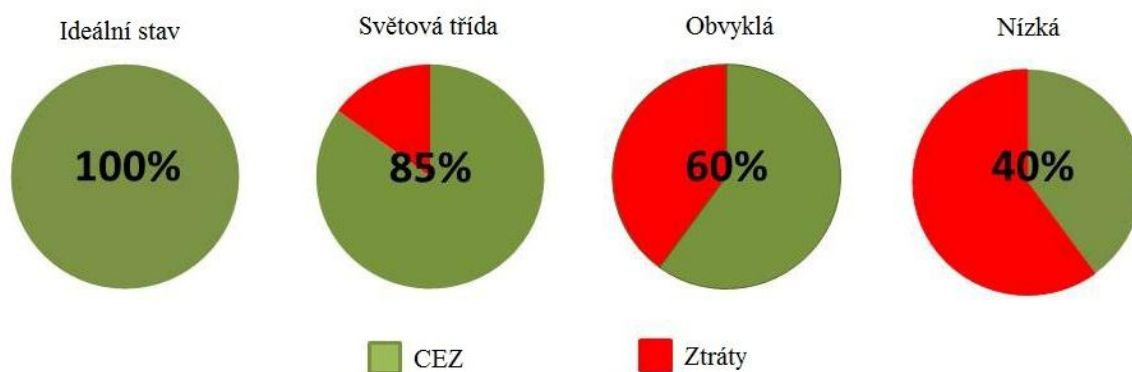
ÚVOD.....	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
1.1 Variantní řešení.....	12
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ	18
2.1 Svařování laserem.....	18
2.2 Svařování metodou TIG	22
2.3 Hybridní svařování Laser - TIG	24
2.4 Svařitelnost materiálů	25
2.4.1 Uhlíkový ekvivalent	26
2.4.2 Předehřev materiálu.....	27
2.4.3 Vady svarů.....	29
2.5 Elektronová mikroskopie.....	31
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
3.1 Svaření vzorků.....	35
3.2 Makrostruktura	38
3.2 Mikrostruktura	42
3.3 EDX analýza.....	46
3.4 Mikrotvrdost	52
4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	60
5 ZÁVĚRY	61
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých zkratk a symbolů	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [10], [9], [44], [6]

Jako v každém oboru, tak i ve strojírenství je nutné hledat neustále nové cesty a způsoby, jak dosáhnout ekonomičtějších, rychlejších a hlavně lepších výsledků, případně jakým způsobem zefektivnit stávající výrobu za účelem zachování stejné kvality výrobku viz obr. 1. Jedno z nejrozšířenějších a nejčastěji uváděných hledisek efektivity výrobního zařízení je Celková efektivnost zařízení (CEZ) obr. 2, která je však známější pod anglickým názvem Overall Equipment Effectiveness (OEE). Ve snaze o co nejefektivnější výrobní závod jsme nuceni objevovat a testovat nové postupy, materiály, materiálové toky a samotnou kombinaci všech možných parametrů, které zde byly či nebyly zmíněny a které ovlivňují právě zmíněnou OEE. Mezi taková opatření se řadí postupy vícestrojové obsluhy, třísměnného provozu, zavádění štíhlé výroby (LEAN) a Six Sigma Method, přes vynechání některých operací při změně nástroje za předpokladu zachování stejných geometrických a rozměrových tolerancí, až po vymyšlení zcela nových technologií nebo jejich kombinací. Takovou kombinací může být např. technologie hybridního svařování Laser – Tig dále LATIG, která se v současné době testuje např. pro svařování Tailor Blanks (přístřihy na míru), dále pro svařování pozinkovaných plechů v automobilovém průmyslu, svařování průvarem nebo svařování jemnozrnných pevnostních ocelí s využitím přehřevu/dohřevu základního materiálu. Všechny tyto metody implementujeme za účelem snížení nákladů, hmotnosti konstrukce, ceny, zkrácení výrobních časů a v neposlední řadě ulehčení životnímu prostředí.



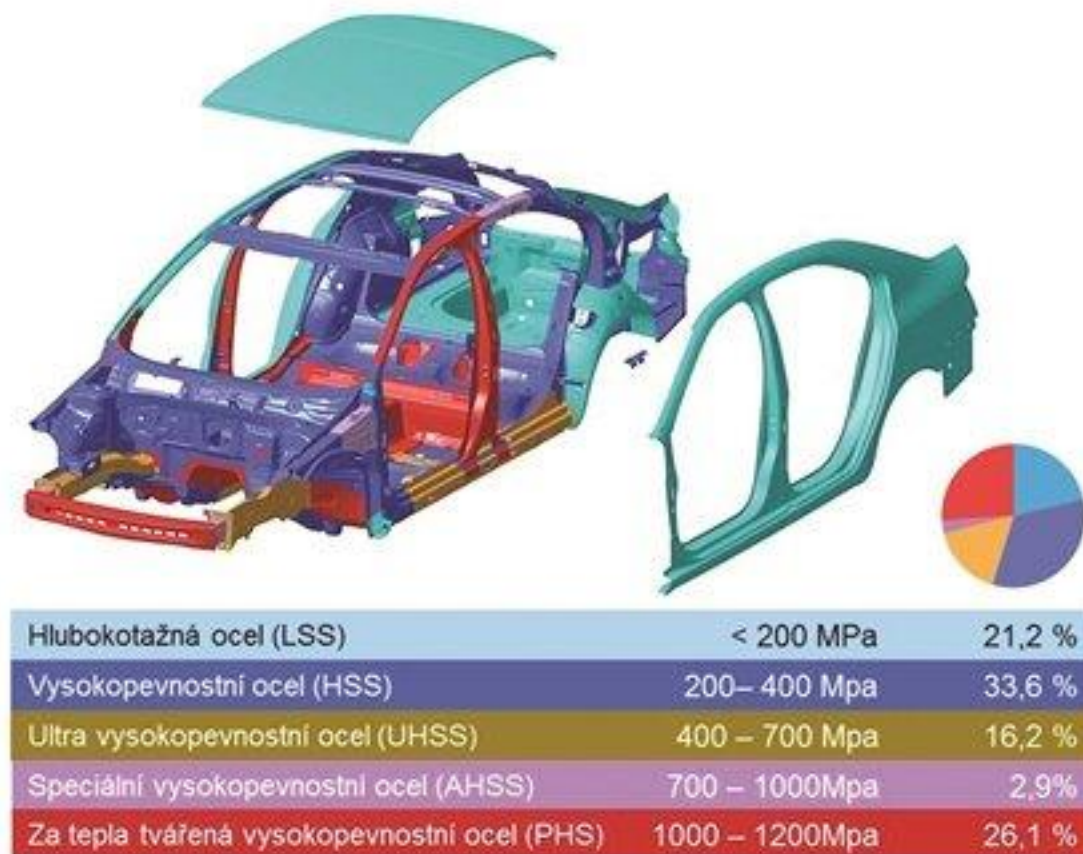
Obr. 1 Srovnání výroby karoserie [9]



Obr. 2 CEZ ve světě [44]

1 ROZBOR ZADÁNÍ [10], [9], [1], [7], [11], [15], [16], [17], [3], [43], [14]

Svařovaný materiál Domex 460 MC patří mezi nízkolegovanou ocel s vysokou pevností, také označované jako High Strenght Steel (HSS). Vysoké mechanické vlastnosti materiálu jsou dané především díky jemnozrnné struktuře, která je dosažena termomechanickým zpracováním. Takové oceli obsahují mikrolegury prvků jako jsou Al, Nb, Ti a V. Koncentrace těchto prvků obvykle dosahuje 0,15 hm. %. Tyto prvky zapříčiní vznik jemnozrnné struktury. Experimentálně budou různorodé vzorky materiálu o velikosti 100x10x3 mm svařeny tupým svarem. Výstup práce bude směřován na problematiku chování materiálu Domex 460 MC v závislosti na svařování nových progresivních metod a svaření s různými druhy materiálu (neboli heterogenní svar). Jemnozrnná struktura bude jedním z důležitých bodů výzkumu této práce, a to z důvodu vnesení tepla při svařování, při kterém může dojít ke zhrubnutí zrna a následně ke snížení mechanických vlastností materiálu, nebo k tvorbě martenzitické struktury v tepelně ovlivnitelné oblasti (TOO) v důsledku velmi rychlého ochlazování $t_8/5$. Celá tato problematika se řeší především v automobilním obr. 3 a leteckém průmyslu pod označením Tailored Blanks (TB), překládáno jako přístřihy na míru.



Obr. 3 Použití TB v karoserii Škoda Octavia III [43]

Materiály svařené v experimentální části se používají např. pro výrobu prahů, deformačních elementů a předních podélných nosníků karoserií Škoda Octavia III. Všechny zmíněné součásti jsou svařeny z více materiálů, ve značné míře se podílí na zvyšování bezpečnosti a zároveň na snižování hmotnosti automobilů. Nižší hmotnost má výrazný vliv na snížení spotřeby automobilu, a tím na celkové snížení emisí.

TB jsou tvořeny ze dvou, či více plechových přístřihů, které se liší těmito parametry:

- tloušťka plechu,
- použitý materiál (rozdílná struktura a mechanické vlastnosti),
- povrchová úprava,
- tepelná úprava.

Výhody TB:

- snížení materiálových nákladů,
- snížení hmotnosti výrobku,
- kombinace výhodných vlastností různých druhů materiálu,
- snížení počtu montážních a tvářecích úkonů,
- zvýšení bezpečnosti při kolizi.

Nevýhody TB:

- vysoká cena nástrojů,
- vysoké náklady na provoz svařování,
- technologická náročnost procesu,
- vysoké nároky na používané stroje.

Mezera při laserovém svařování má zásadní vliv na kvalitu svaru. Při svařování TB v průmyslové výrobě by byl velký problém zajistit požadovanou velikost mezery svařovaných dílů. Nejčastěji se volí mezera od 0 do 0,2 mm, což samozřejmě záleží na průměru svazku. V této práci byl použit průměr svazku 0,3 mm a mezera mezi díly 0 mm. Avšak v případě sériové výroby za předpokladu svařování dlouhých svarů pro TB by bylo velmi obtížné docílit takové přesnosti, a to i za předpokladu velmi dobrého přípravkování, které je pro laserové svařování nezbytné. Proto se vyvíjejí nové metody svařování, které by mohly tento problém zvrátit. Mezi takové metody patří LATIG nebo svařování rozmitáním svazků.

Základní materiál pro všechny svary je Domex 460 MC, který bude svařen dvěma různými metodami a následně zkoumán v závislosti na druhu svařovací metody a dalším svařovaném materiálu, kterým je Domex 700 MC, S355J2 a DC01. Všechny tyto materiály jsou hojně používané pro TB a mají rozdílné chemické a mechanické vlastnosti viz tab. 1 až 8.

Tab. 1 Chemické složení materiálu Domex 460 MC (kompletní tabulka v příloze 1).

Materiál	Chemické složení (složení v %)					
	C (max.)	Si (max.)	Mn (max.)	P (max.)	S (max.)	Altot (min.)
Domex 460 MC	0,1	0,031	1,5	0,025	0,021	0,015

Materiál Domex 700 MC je podobný materiál jako Domex 460 MC, liší se však v chemickém složení a mechanickými vlastnostmi.

Tab. 2 Chemické složení materiálu Domex 700 MC (kompletní tabulka v příloze 1).

Materiál	Chemické složení (složení v %)					
	C (max.)	Si (max.)	Mn (max.)	P (max.)	S (max.)	Al (min.)
Domex 700 MC	0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	0,015

S355J2 patří mezi základní konstrukční ocel se zaručenou svařitelností. Daná ocel je vhodná pro aplikace s vyšší mezí kluzu, staticky a dynamicky namáhané svařované konstrukce.

Tab. 3 Chemické složení materiálu S355J2.

Materiál	Chemické složení (složení v %)					
	C (max.)	Si (max.)	Mn (max.)	P (max.)	S (max.)	N
S355J2	0,2	0,55	1,6	0,025	0,025	0,015

DC01 je nízkouhlíková nelegovaná ocel válcovaná za studena. Ocel je dobře obrobitelná, svařitelná a tvařitelná. Její hlavní využití je u tváření za studena, dále je vhodná pro povrchové úpravy, jako je lakování, smaltování a pokovování.

Tab. 4 Chemické složení materiálu DC01.

Materiál	Chemické složení			
	C	Mn	P	S
DC01	0,121)	0,61)	0,045	0,045

Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu Domex 460 MC.

Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A80 [%]
Domex 460 MC	460	520 až 670	15

Tab. 6 Mechanické vlastnosti materiálu Domex 700 MC.

Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A80 [%]
Domex 700 MC	700	750 až 950	10

Tab. 7 Mechanické vlastnosti materiálu S355J2.

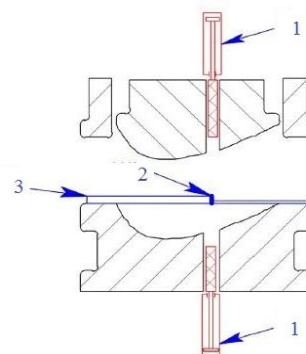
Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A10 [%]
S355J2	355	470 až 630	22

Tab. 8 Mechanické vlastnosti materiálu DC01.

Materiál	Mez kluzu Re [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A10 [%]
DC01	min. 200	min. 300	min. 10

1.1 Variantní řešení [4,10,9,1,7,3,13,49,27,21,74,37,39,38,46,47,34,12]

V průmyslu se TB obr. 5 nejčastěji svařují odporovým svařováním obr. 7, metodou FSW (Friction Stir Welding) obr. 6, laserem obr. 10 a mnoha dalšími metodami svařování, které budou popsány v kapitole 1.1 Rozbor zadání. V této kapitole bude dále proveden rozbor vhodného předehřevu pro danou operaci. Pro další technologické operace (jako je hluboké tažení a stříhání) nejsou vhodné svařovací technologie s přídavným materiálem, který v důsledku tvoří mezi plechy převýšení. Převýšení může způsobovat problémy v operacích hlubokého tažení a stříhání. Podobná problematika se rovněž řeší u svařovaných plechů rozdílné tloušťky obr. č. 4. Ze stejného důvodu se nesmí plechy překrývat. Podobné úpravy tvářecích nástrojů výrazně zvyšují cenu nástroje a následně i cenu výrobku. TB jsou polotovarem pro operace tváření a vlivem své jemnozrnné struktury bude výběr svařovací metody velmi náročný.



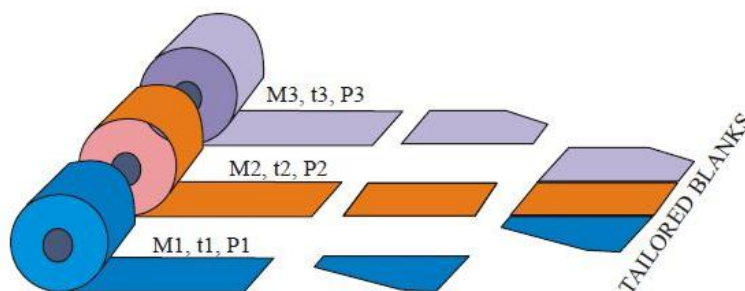
- 1) Hydraulický válec 2) svar
3) svařený polotovar rozdílů tloušťek

Obr. 4 Nezbytná úprava pro hluboké tažení z polotovaru s rozdílnou tloušťkou [10]

Z tohoto důvodu nebudou zmíněny technologie svařování obalovanou elektrodou, MIG/MAG a svařování pod tavidlem. Všechny tyto procesy vnášejí do svařovaného materiálu velké množství tepla a vzniká při nich převýšení v podobě přídavného materiálu.

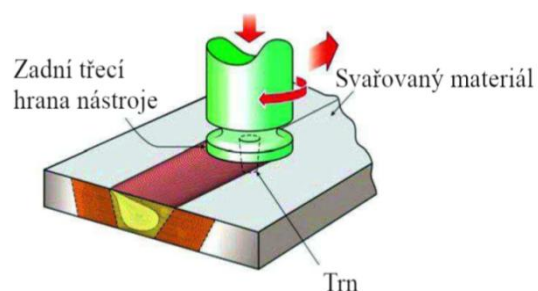
Vhodné technologie pro výrobu TB jsou:

- FSW,
- odporové svařování,
- svařování elektronovým paprskem,
- svařování vysokými frekvencemi,
- třecí svařování,
- svařování laserem,
- hybridní svařování LATIG.



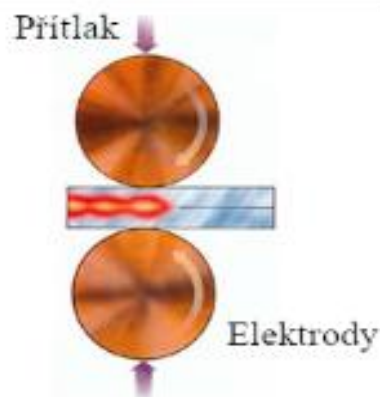
M – materiál, t – tloušťka, P – povrchová úprava
Obr. 5 Schematický princip výroby TB [9]

FSW – Metoda pracuje bez použití přídavných materiálů, bez tavení základních materiálů, s vysokou kvalitou svaru a s minimální TOO, proto nejsou v TOO materiálu sníženy mechanické vlastnosti. Spoj vzniká vtlačováním rotujícího trnu do základního materiálu, kde je nataven do plastického stavu a dochází k promísení obou kovů. Nejčastěji se používá v automobilovém, leteckém, železničním a loďařském průmyslu a v kosmonautice. Tato metoda však není vhodná pro ocel, využívá se převážně hliníkové a hořčíkové slitiny.



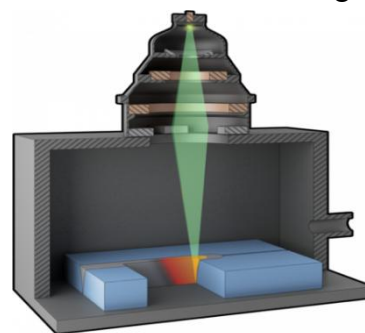
Obr. 6 Svařování metodou FSW [12]

Odporové svařování švové – patří mezi vysoce produktivní svařování patřící do skupiny tlakového svařování. Teplo potřebné pro vytvoření svaru vzniká ve svařovaném dílci díky elektrickému odporu v místě styku elektrody a svařovaných materiálů. Svařované materiály se zahřejí, nebo roztaví, následně jsou materiály přitlačeny k sobě a vznikne svarový spoj. U švového svařování je svar tvořen odvalováním elektrod (kladek), mezi kterými se pohybují svařované materiály. Tak je tvořena řada překrývajících se bodů, které vytvářejí celistvý svar. Mezi výhody této metody patří: rychlost, cena, snadná automatizace, kvalita a opakovatelnost svarů. Mezi nevýhody patří: nutnost překrytí materiálu a velké vnesené teplo, které zničí jemnozrnnou strukturu oceli DOMEX 460 MC, díky které má ocel právě své mechanické vlastnosti.



Obr. 7 Švové svařování [13]

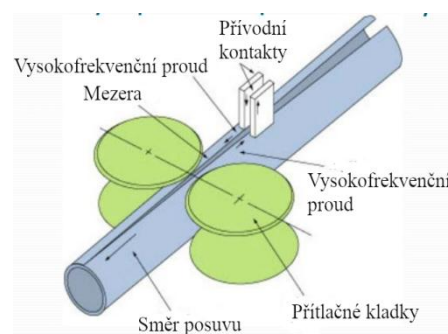
Svařování svazkem elektronů – je řazeno mezi tavné svařování, pro které je charakteristický hluboký a úzký svar. Princip svařování pracuje na změně kinetické energie elektronu, která se při dopadu mění v tepelnou energii. V pracovní komoře je nezbytné vakuum, a to až $5 \cdot 10^{-4}$ Pa obr. 8. Vakuum v pracovní komoře je nutné např. z důvodu zamezení střetu elektronů s molekulami vzduchu, které vychylují a snižují kinetickou energii elektronu. Nepřítomnost vzduchu navíc zlepšuje svařovací proces. Výhody svařování svazkem elektronů jsou: svaření různých druhů materiálů, nízká hodnota vneseného tepla a svařovací rychlost. Mezi nevýhody patří: značně velký nepoměr přípravných časů ke svařovacímu času (především při vytváření vakua), cena, omezené rozměry komory a nutnost vakua. Přípravné časy a rozměry komory patří mezi omezující faktory.



Obr. 8 Svařování svazkem elektronů [47]

Svařování vysokými frekvencemi – je považováno za odporové svařování. Teplo je v materiálu vytvářeno střídavým proudem o vysoké frekvenci, která v materiálu vytváří vířivé proudy a následně ohřev na teplotu tavení základního materiálu obr. 9.

Největší proudová hustota je na hranách a na povrchu svařovaného materiálu. Tento efekt se nazývá skinefekt. Metoda se nejčastěji používá pro svařování trubek a profilů. Výhody svařování vysokými frekvencemi jsou: nízká hodnota vneseného tepla a malá TOO v porovnání s odporovým svařováním. Mezi výhody patří: vysoká svařovací rychlost, nízká spotřeba energie a svařování velmi tenkých plechů. Mezi nevýhody patří: náročnost seřízení technologie, nebezpečí úrazu vysokým proudem a neekonomická výroba pro menší série výroby. Pro svařování vysokými frekvencemi je vhodná metoda pro výrobu TB, ale vnesené teplo pro svaření materiálu Domex 460 MC je stále příliš vysoké a jemnozrnná struktura a mechanické vlastnosti oceli by mohly být narušeny.



Obr. 9 Svařování vysokými frekvencemi [20]

Svařování laserem – patří do skupiny tavného svařování a ve většině případů bez přídavného materiálu obr. 10. Svařování laserem je jedna z nejpoužívanějších technologií na spojování heterogenních svarů, a to z důvodu vysoké hustoty vnesené energie zaostřené do malého bodu. Díky tomu lze svařovat vysokými rychlostmi s malou TOO. Mezi další výhody patří: svaření dílců s vysokou produktivitou a dobrými rozměrovými tolerancemi a možnost plně automatizovaného pracoviště. Na druhou stranu vysoká hustota a rychlost vnesené energie sebou přináší nevýhodu v podobě velmi rychlého ochlazování, v důsledku kterého se může vyskytnout martenzitická struktura svařeného kovu i v případě ocelí s nízkým procentem uhlíku. Všechny tyto výhody jsou v automobilovém průmyslu velmi ceněny.



Obr. 10 Laserové svařování [74]

Hybridní svařování Laser-TIG (LATIG) – je kombinace svařování laserem a obloukovým svařováním s netavicí se elektrodou obr. 11, kde elektrický oblouk poskytuje další tepelný zdroj a pracuje zde jako předehřev či dohřev svařovaného materiálu. Hybridní svařování LATIG kombinuje hluboký průnik svaru laseru s dobrou stabilitou svarové lázně TIGu. Výhody této metody jsou: zlepšení metalurgické stability v případě některých materiálů, což znamená, že svar je pevnější a méně křehký, velmi příznivá ekonomická stránka díky vnesení levného výkonu TIGu do procesu svařování. Laser o stejném výkonu jako LATIG by byl výrazně dražší variantou.



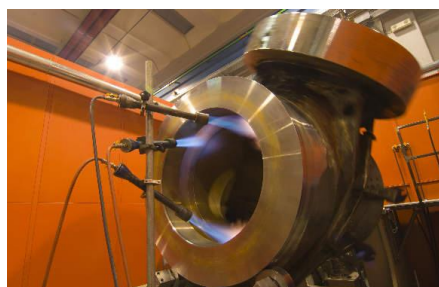
Obr. 11 Svařování metodou LATIG [34]

Volba druhu předehřevu závisí na mnoha faktorech, které se vzájemně ovlivňují. Mezi nejdůležitější faktory patří: počet kusů, materiál, svařovací a předehřívací technologie a velikost svařovaného dílce, která určuje, zda bude předehřev možný v peci, či bude nutná jiná lokální metoda ohřevu. Mezi kvalitativní faktory výběru vhodné technologie předehřevu patří: regulace teploty, rovnoměrnost ohřevu a efektivita technologie. Z důvodu velikosti svařovaných TB a přidané manipulace byly zavrženy metody předehřevu či dohřevu v pecích,

a bude proveden rozbor pro technologie, které jsou schopny pracovat v kontinuálním režimu svařovacích linek. Z těchto důvodů nebude zvažován odporový předehřev, který má velmi dobrou regulaci teploty díky zabudovaným termočládkům, a rovnoměrný ohřev. Avšak odporový předehřev je vhodný pro statické aplikace a může se použít i pro následné tepelné zpracování dílu.

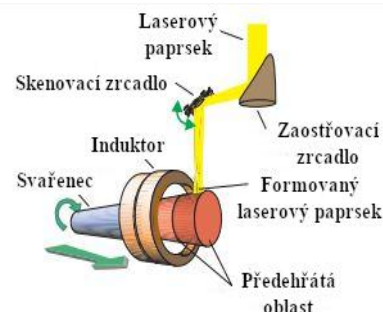
Vhodné technologie pro předehřev TB jsou obsaženy ve výčtu níže.

Ohřev plamenem – patří mezi častou a velmi univerzální metodu předehřevu obr. 12, která je vhodná jak pro lokální použití, tak při použití speciálních nástavců k plošnému předehřevu. V praxi se používá několik druhů paliva. Nejčastěji to jsou paliva kyslík s acetylenem, propan a butan. Mezi výhody patří: univerzálnost zařízení bez nutnosti elektrické energie a nízká pořizovací cena. Mezi nevýhody patří: špatná regulace teploty či místa předehřevu a špatná automatizace pro větší výroby TB. O zavedení předehřevu plamenem do průběžné svařovací linky by se dalo uvažovat, dokonce na trhu existují hořáky s automatickým zapalováním a regulací výšky hořáků, např. FIT+ three, ty jsou však prioritně určeny pro dělení materiálu. Současný trh nám nabízí mnohem zajímavější řešení.



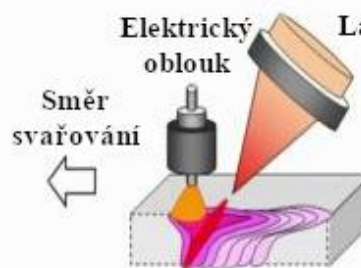
Obr. 12 Předehřev plamenem [37]

Indukční ohřev – patří mezi velmi progresivní a zajímavou metodu předehřevu. Pracuje na principu vířivých proudů, kdy je do blízkosti cívky se střídavým proudem vložen elektricky vodivý předmět. Ztráty elektromagnetického pole se mění na teplo a vložený předmět se rychle zahřívá. Laserové svařování s indukčním předehřevem se již ve výrobě používá, např. na obr. 13 pro 6stupňové převodovky pro výrobu speciálních automobilů. Mezi výhody patří: příznivý teplotní gradient, rychlost ohřevu je shodná s rychlostí svařování laserem, dobrý poměr investičních a provozních nákladů a minimální TOO. V některých případech lze při použití pomalého ochlazování dosáhnout beztrhlinové a jemnozrnné struktury svaru. Na základě tvaru induktoru je indukční předehřev vhodný převážně pro menší výrobky.



Obr. 13 Indukční předehřev [24]

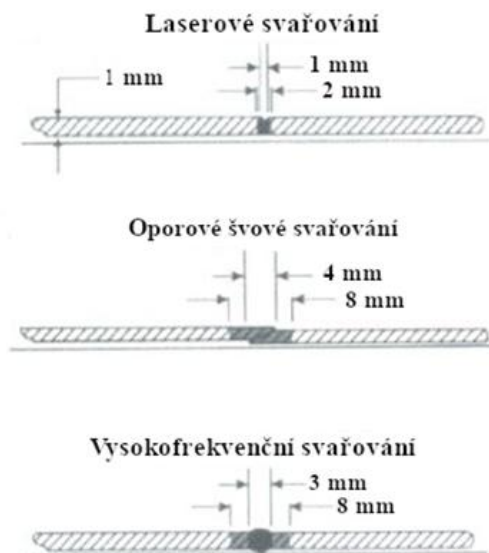
Ohřev elektrickým obloukem obr. 14 – Jedná se o klasický princip použití známých metod svařování (TIG, MIG, MAG) za účelem spojení materiálů a využití výhod obou technologií svařování. Podle konkrétní aplikace se používají jednotlivé metody TIG, MIG, nebo MAG. Tyto jednotlivé kombinace jsou v dnešní době více či méně ve fázi výzkumu nebo jsou nasazeny ve výrobě. Mezi výhody patří: pořizovací a provozní cena, dobrá automatizace, regulace teploty a místa předehřevu a možnost umístění zařízení přímo na laserovou hlavu. Díky umístění přímo na laserové hlavě je proveden předehřev a svaření ve stejném procesu. Z toho vyplývá velmi dobrá efektivita pro spojení technologií svařování



Obr. 14 Předehřev elektrickým obloukem [47]

laserem a technologií obloukového předehřevu TIG. Z těchto zmíněných důvodů, a protože se jedná o dosud málo prozkoumanou oblast, je vybrána metoda předehřevu obloukovou metodou TIG.

Pro svaření v souladu se zadanými kritérii nesplňuje požadavky metoda FSW, a to z důvodu svařování oceli. Tato metoda je vhodná pouze pro měkké materiály, jako je např. hliník. Odporové švové svařování bylo zamítnuto kvůli překrytí svařovaných přístřihů a velkému vnesenému teplu. Svařování svazkem elektronů není vhodné z důvodu produktivity, omezených rozměrů svařované komory a v neposlední řadě kvůli časové a technické náročnosti. Špatná flexibilita výroby, náročné seřizování, velké vnesené teplo, a tím i velká TOO obr. 15, vyřazují z výběru techniku svařování vysokými frekvencemi. Dále byl výběr veden do oblasti předehřevu materiálu. Předehřev plamenem je charakteristický špatnou automatizací, regulací teploty a místa ohřevu, a proto nebyl vybrán. Indukční předehřev má velmi dobré charakteristiky pro svařování TB, pro výsledné zkoumání však nebyl vybrán, a to kvůli možnosti zkoumání nové produktivní a zároveň levné alternativy.

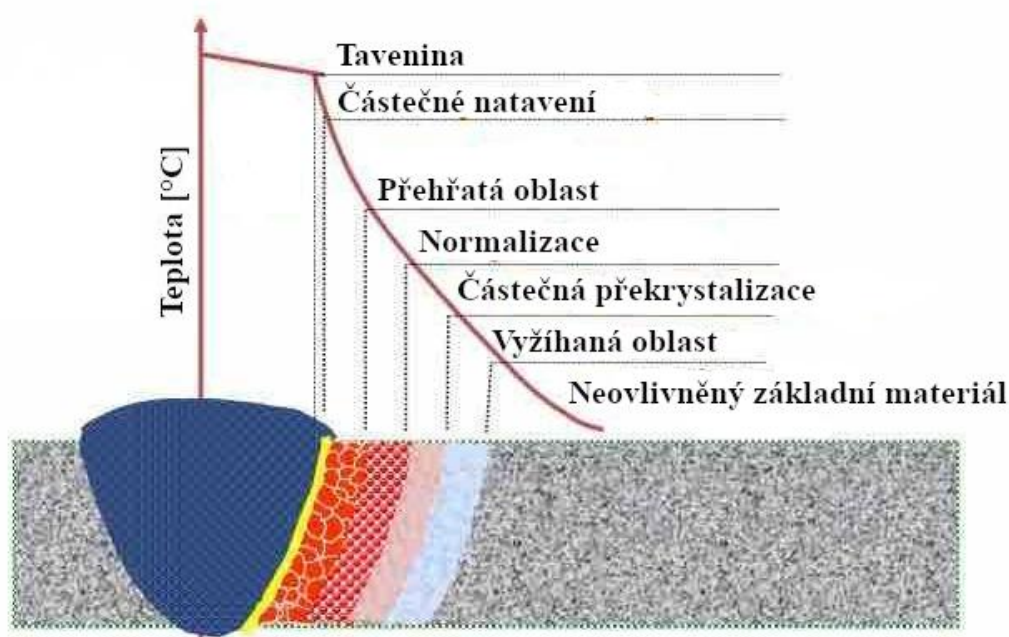


Obr. 15 Vliv technologie na velikost TOO [46]

Pro potřeby zadání diplomové práce byly vybrány dvě svařovací technologie, a to svařování laserem a hybridní metoda svařování LATIG. Metoda svařování laserem je flexibilní, lehce automatizovaná, s nízkým vneseným teplem a malou TOO. Tato metoda se již při výrobě TB využívá s velmi dobrými výsledky. Předehřev pomocí TIGu byl vybrán především pro výhodnou vzájemnou kombinaci obou technologií. Technologie se pozitivně vzájemně doplňují a nabízejí výrobnímu procesu výhody obou technologií.

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ [14], [32], [64]

Svařování je jedním z nejpoužívanějších způsobů výroby nerozebíratelných spojů, a proto má v průmyslu nezastupitelnou roli. Všechny metody rozebírané v práci patří do skupiny tavného svařování. Intenzivním zdrojem tepla jsou nataveny plochy základního materiálu a vytvoří se tavná lázeň. Ve většině případů je do tavné lázně přidáván přídatný materiál nejčastěji ve formě drátu. Atomy kovu se v tavenině volně pohybují a mohou se přiblížit k nenataveným plochám na vzdálenost parametru mřížky základního materiálu, a v případě, že roztavený kov smáčí stěny, je splněn předpoklad pro vytvoření kovové vazby.

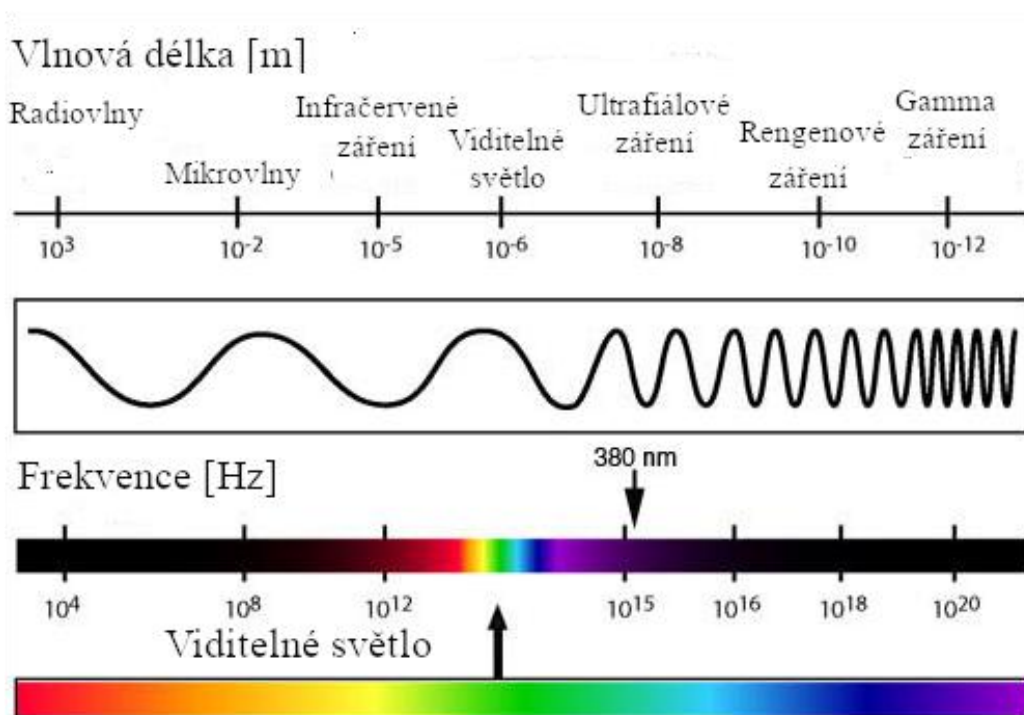


Obr. 16 Svarový spoj [29], [64]

V okamžiku zastavení zdroje tepla dochází k ochlazování tavné lázně a na stěnách začíná krystalizovat roztavený kov. Od stěn je odváděno teplo nejrychleji, a tím probíhá krystalizace kovu nejdříve. Vznikající krystaly se s tuhým kovem zpravidla pojí kovovou vazbou. Nerozebíratelný spoj vznikne po stuhnutí celé svarové lázně. S ohledem na vlastnosti svaru, použité technologie a způsob zatížení je zvolena úprava svarové plochy. Nejčastěji se jedná o broušení, zbavení strusky či elektrochemické čištění.

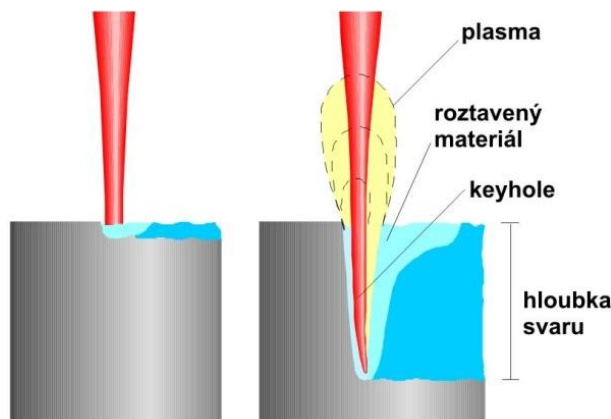
2.1 Svařování laserem [8],[14],[1],[24],[51],[52],[53],[54],[55],[67],[68],[69],[71]

Laser pracuje na základě zákonů kvantové fyziky a planetárního modelu atomu. Slovo laser je složeno z počátečních písmen samotné podstaty, Laser (Light Amplification by stimulated Emission of Radiation), což lze přeložit jako zesilování světla stimulovanou emisí záření. Dělení laserů je velmi rozmanité. Každý typ laseru má rozdílné charakteristiky v závislosti na aktivním médiu, a tím se mění i vlnová délka paprsku. Základní přehled vlnových délek je na obr. 17. Mezi porovnávací charakteristiky patří např. dosahovaný výkon, oblasti použití vlnové délky aktivního prostředí a mnoho dalších. V diplomové práci bylo provedeno rozvržení rozdělení a charakteristik laserů podle druhů laserů tab. č. 9. Dále byly popsány pracovní režimy laserů a byl popsán princip vláknových pevnolátkových laserů.



Obr. 17 Rozdělení vlnových délek [23], [29]

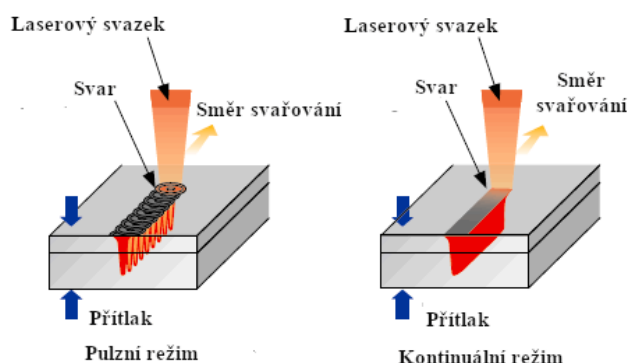
Laserový svazek má vysokou plošnou hustotu výkonu. V místě průniku svazku dochází k ohřevu materiálu tak vysokou rychlostí, že se nestihnou uplatnit mechanismy vedení a sálání tepla. Roztavení, vytvoření a ztuhnutí svarové lázně probíhá v porovnání s ostatními metodami velmi rychle. V důsledku toho dostaneme malou TOO, velmi malé teplotní deformace svaru, vysokou rychlost svařování a mnoho dalších výhod. Na druhou stranu to přináší i nevýhody, jako jsou velmi vysoká rychlost ochlazování a vysoký teplotní gradient. V závislosti na vstupních parametrech laseru je možné svařovat kondukčně, nebo penetračně obr. 18. Přenos tepla ze svazku do materiálu probíhá pouze za kondukce tepla. Hloubka svaru se pohybuje v rozsahu 0,1 až 1 mm a šířka svaru je větší než jeho hloubka. Tepelná vodivost materiálu zde omezuje maximální hloubku svaru. Kondukční režim roztavuje materiál podél místa spojení, ten je následně promísen a ztuhne. Kondukční režim se používá převážně na svařování tenkostěnných součástí, kde vytváří hladký a zaoblený svar. Svar ve většině případů již nevyžaduje další úpravu. Pro tento režim svařování se nejčastěji využívají pevnolátkové lasery. V penetračním režimu vzniká hluboký a úzký otvor, který je obklopen tekutým kovem a vyplněn parou. Tento otvor je nazýván keyhole a vzniká v něm stejnoměrná struktura svaru. Roztavený kov obtéká kapiláru a na druhé straně tuhne, tím vzniká hluboký a úzký svar v poměru až 10:1. Penetrační režim se vyznačuje účinností a rychlostí svařování, malou TOO a používá se v případech, kdy je nutné provést hluboký svar, nebo při svařování více vrstev materiálu.



Obr. 18 Kondukční a penetrační režim [50]

Kondukční režim roztavuje materiál podél místa spojení, ten je následně promísen a ztuhne. Kondukční režim se používá převážně na svařování tenkostěnných součástí, kde vytváří hladký a zaoblený svar. Svar ve většině případů již nevyžaduje další úpravu. Pro tento režim svařování se nejčastěji využívají pevnolátkové lasery. V penetračním režimu vzniká hluboký a úzký otvor, který je obklopen tekutým kovem a vyplněn parou. Tento otvor je nazýván keyhole a vzniká v něm stejnoměrná struktura svaru. Roztavený kov obtéká kapiláru a na druhé straně tuhne, tím vzniká hluboký a úzký svar v poměru až 10:1. Penetrační režim se vyznačuje účinností a rychlostí svařování, malou TOO a používá se v případech, kdy je nutné provést hluboký svar, nebo při svařování více vrstev materiálu.

Svařovací laserový paprsek pracuje ve dvou režimech: pulzním, nebo kontinuálním. Jednotlivé režimy jsou zobrazeny na obr. 19. Pro pulzní režim je aktivní médium buzeno impulsem a vytváří se časově přerušovaný paprsek laseru. Mezi důležité parametry pulzního režimu patří: frekvence pulzů, energie a doba trvání pulzu. Kontinuální režim produkuje nepřerušovaný laserový paprsek, kde aktivní médium je buzeno nepřetržitě. Svařování homogenních svarů v kontinuálním režimu a za použití optimálních podmínek by mělo ponechat rozměry svaru, strukturu materiálu a tvar podél osy svaru beze změny.



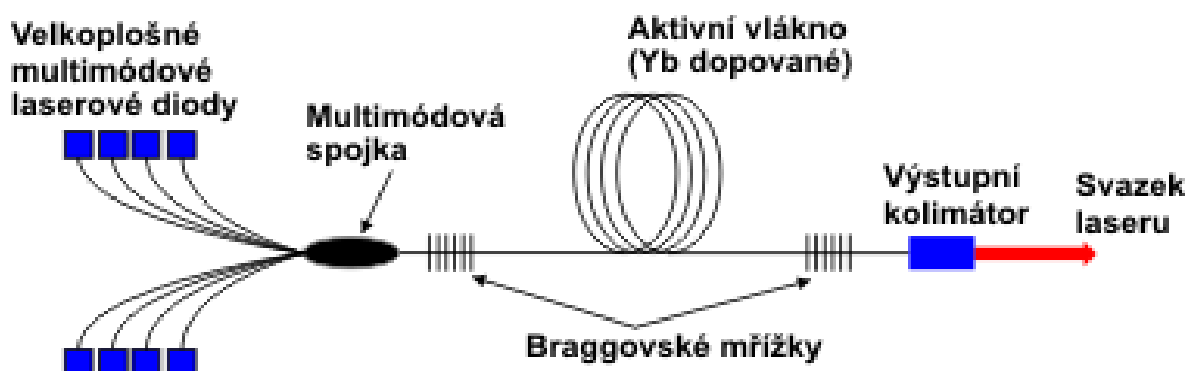
Obr. 19 Pulzní a kontinuální režim [54]

Keyhole je kapilára vytvářející se při laserovém svařování s hustotou výkonu minimálně 1 až 100 MW·cm⁻² (odpaření kovu).

Tab. 9 Porovnání typů laserů [4], [8], [35], [58], [67].

Typ laseru	Charakteristika laseru	Použití	Životnost [h.]
CO2 laser	vlnová délka 10,6 μm, paprsek je ve vzdálené infračervené oblasti, medium laseru je plynové CO ₂ -N ₂ -He, průměrný výkon 1 až 15 KW, maximální 50 kW, účinnost 10 až 15 %	svařování, řezání, gravírování a značení	cca 20 000
Pevnolátkový laser buzený lampou	vlnová délka 1,06 μm, paprsek je v blízké infračervené oblasti, medium laseru je pevná látka Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ granát, průměrný výkon 50 až 7000 W, maximální 10 kW, klady: účinnost 1 až 4 %	svařování, řezání, gravírování, značení	cca 10 000
Diodový laser	vlnová délka 0,8 až 1,1 μm, paprsek je v blízké infračervené oblasti, medium laseru je pevná látka InGaAsP, průměrný výkon 10 KW, maximální 15 kW, klady: účinnost 20 až 47 % a kompaktnost zařízení	svařování, kalení a navařování	cca 15 000
Diskový laser	vlnová délka 1,03 μm, paprsek je v blízké infračervené oblasti, medium laseru je pevná látka Yb ³⁺ :YAG, nebo YVO ₄ atd., průměrný výkon 15 KW, maximální 16 kW, klady: vysoká účinnost 20 až 35 %, vysoká intenzita	řezání a svařování	cca 10 000
Vláknový laser	vlnová délka 1,07 μm, paprsek je v blízké infračervené oblasti medium laseru je pevná látka Yb ³⁺ :SiO ₂ , průměrný výkon 15 kW, maximální 100 kW, klady: vysoká účinnost až 60 %, vysoká intenzita a kvalita svazku	řezání, svařování, značení, gravírování a mikro obrábění	cca 100 000

K emisi laseru slouží jako stimul čerpací laserové diody a jako zesilovač aktivní optické vlákno. Aktivní prostředí vláknového laseru je ytterbiem dopované dlouhé optické vlákno. Přes optickou spojku je buzeno z laserových diod do aktivního vlákna. Procházejí Braggovskými mřížkami a následně záření odejde přes optický kolimátor. Braggovské mřížky nahrazují mechanická zrcadla. Použití zrcadel mělo své nevýhody, mezi ty nejzávažnější patřily: ztráta energie, náchylnost na nastavení rezonanční frekvence, nutnost naprosto přesného umístění anebo náchylnost vůči mechanickému poškození. Nahrazením zrcadel Braggovskými mřížkami se stal laser odolným do té míry, do které je odolné optické vlákno. Schéma vláknového laseru je popsáno na obr. 20. Vláknó má různé profily, jako jsou např. čtvercové, obdélníkové apod. V důsledku toho se mění specifikace a využití laserového paprsku. Laser je tvořen tzv. moduly, které umožňují jejich vzájemné spojování, a tím i navyšování výkonu až na 100 kW. Vláknové lasery mohou pracovat v několika režimech svařování, patří mezi ně: pulzní, kontinuální, nebo kvazipulzní. Další charakteristiky vláknových laserů jsou uvedeny v tab. x.



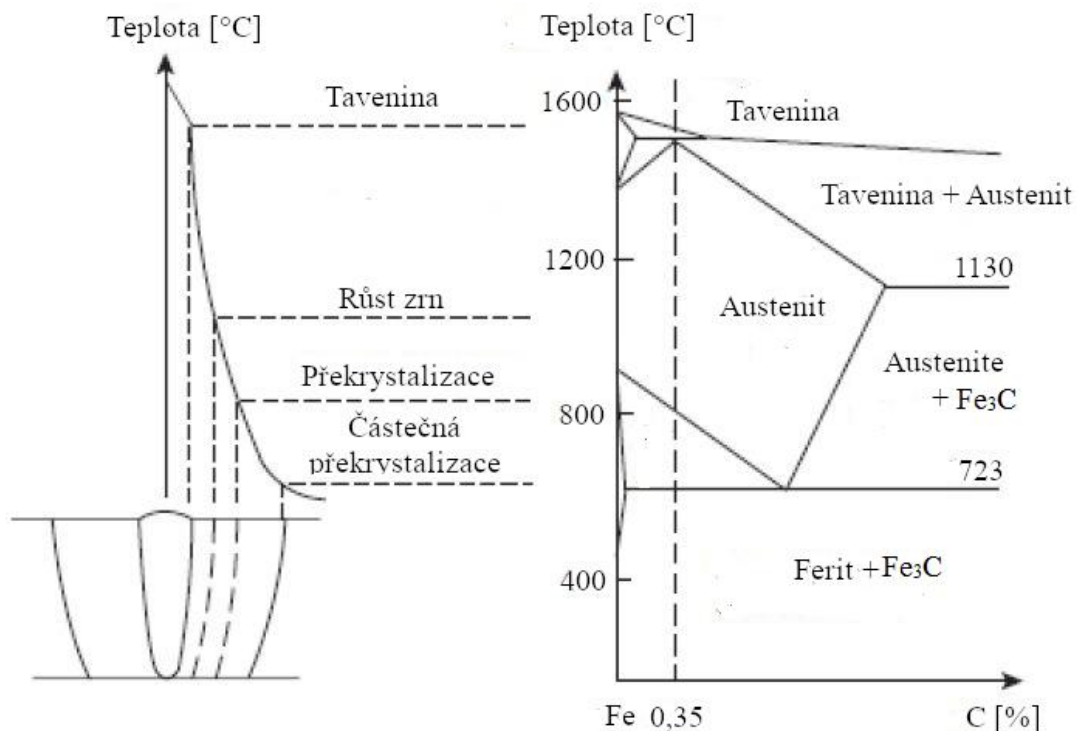
Obr. 20 Schéma vláknového laseru [67]

Laserové svařování je charakteristické vnesením velkého množství tepla do velmi malé oblasti. Teplotní cyklus laserového svařování je velmi strmý obr. 21, čímž vzniká velká rychlost ohřevu až $3000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ a při ochlazování $300\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. V takovém případě se ve svařovaném materiálu nahromadí teplo, které nestačí unikat, a vytváří tak tavnou lázeň, v některých případech se jedná o keyhole. Tak vzniká charakteristický tvar laserového svaru, který má velký poměr hloubky k tloušťce svaru, který je taktéž vidět na obr. 21. Rychlé vytvoření svarové lázně a její následné rychlé ochlazení sebou přináší mnoho výhod a nevýhod, které jsou popsány na konci této podkapitoly.

V ocelích a některých dalších materiálech či slitinách dochází v TOO vlivem vneseného tepla k polymorfní změně struktury oceli. Tyto změny mají výrazný vliv na mechanické vlastnosti svaru. V případě oceli následují přeměny $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. Při svařování v TOO dochází k růstu zrn, jež je ovlivněn chemickým složením materiálu, teplotou předehřevu a tepelným výkonem. To je následně vidět na obr. 21 spolu s TOO rozdělenou do několika zón.

Zhrublé zrno ovlivňuje TOO následovně:

- zvyšuje náchylnost k praskání,
- zhoršuje vrubovou a lomovou houževnatost,
- zhoršuje pevnost,
- kvůli upřednostnění vylučování feritu ve štěpných rovinách austenitu brání zhrublé zrno rozpadu austenitu, čímž vznikají Widmannstättenovy struktury.



Obr. 21 Teplotní cyklus laserového svařování [48]

Pásmo nad teplotou přehřátí má zpravidla výrazně vyšší tvrdost než v ostatních pásmech TOO. Hodnota tvrdosti závisí na chemickém složení, svařovací technologii, teplotě předehřevu a tepelném příkonu. V závislosti na druhu materiálu a konstrukce se tvrdost svarového spoje pohybuje v rozsahu 320 až 450 HV.

Výhody svařování laserem:

- vysoký poměr svaru hloubky k tloušťce od 3:1 do 10:1,
- velká koncentrace tepla v malém bodě má za následek malou TOO, díky které můžeme svařovat heterogenní materiály,
- bezkontaktní proces vede ke snadnému přístupu k místu svaru,
- laserový paprsek neovlivňuje magnetické pole ani průchod vzduchem,
- jednoduše automatizovaný proces,
- používají se vyšší rychlosti svařování než u tradičních svařovacích procesů.

Nevýhody svařování laserem:

- vysoká počáteční investice,
- vysoký teplotní gradient může způsobit trhliny,
- při laserovém svařování dochází k vysokým rychlostem ochlazování, to může vést k tvoření křehkých martenzitických fází, a to hlavně v případě ocelí s vyšším obsahem uhlíku, nebo u některých legovaných ocelí.

2.2 Svařování metodou TIG [1], [14], [3], [26], [25], [36]

Metoda TIG je překládána z anglického Tungsten Inert Gas jako Svařování netavicí se wolframovou elektrodou v inertním plynu, v němčině jí odpovídá slovní spojení Wolfram Inert Gas, pro něž se užívá zkratka WIG.

Svařování metodou TIG patří do skupiny tavného svařování, kde hoří elektrický oblouk mezi netavicí se wolframovou elektrodou a svařovaným materiálem obr. 22. Elektrický oblouk je chráněn ochranným inertním plynem, který nám chrání tavnou lázeň proti interakci atmosférického kyslíku a dusíku a odtavující se kapkám přídavného materiálu, dále chrání elektrodu a samotný oblouk. Velký vliv na kvalitu svarů má příslušná čistota ochranného plynu. Pro metodu TIG se nejčastěji používá argonu, helia případně směsí obou plynů. Díky změně proudu je metodou TIG možné svařovat různé druhy materiálu, jedná se hlavně ocel a hliník. Stejnosměrný proud je vhodný pro ocel, nikl, molybden, měď a zirkon. Střídavý proud slouží převážně ke svaření hliníku, hořčíku a jejich slitin. Svařování metodou TIG se používá především pro konstrukce z vysokolegovaných ocelí pro jaderný, chemický, potravinářský a farmaceutický průmysl, hliníkové a titanové slitiny naleznou využití v leteckém a vesmírném průmyslu.

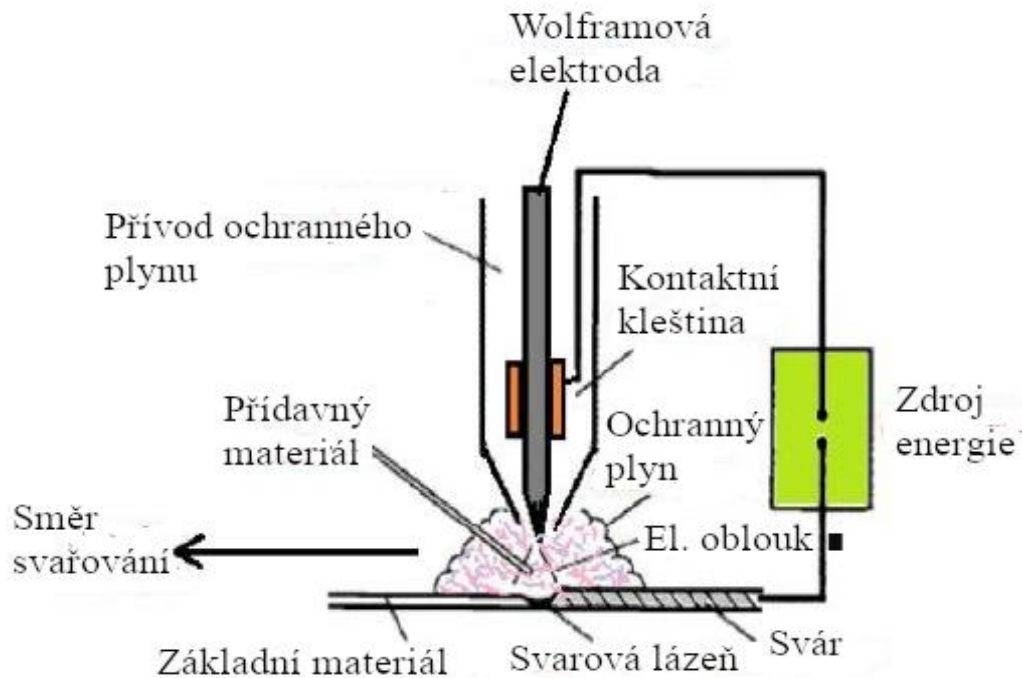
Správný výběr ochranného plynu má významný vliv na správnost svařovacího procesu. Ochranný plyn především chrání tavnou lázeň před atmosférickým kyslíkem a dusíkem, čímž se zvyšuje odolnost proti korozi a zlepšuje se pevnost a tvrdost svařovaného materiálu. Dále snižuje poréznost, urychluje svařovací proces, a tím zefektivňuje výrobu. Jako ochranný plyn se nejčastěji používá argonu, dusíku, helia nebo již zmínovaných plynů s příměsí vodíku, či jejich kombinací. Přítomnost vodíku v ochranné atmosféře způsobuje nárůst napětí na oblouku, a tím zvyšuje svařovací výkon. Na druhou stranu u svařování hliníku či chromové oceli je vodík nežádoucí a nesmí být v ochranné atmosféře použit. Průtok plynu se pohybuje v rozmezí mezi 6 až 12 l/m, u velkých svarů může průtok dosáhnout až 30 l/m. Velkou roli pro výběr ochranného plynu hraje jeho čistota a s ní spojená cena plynu. Čistota plynu je značená dvojčíslem (např. 4.5), kde čtyřka značí počet devítek a pětka poslední hodnotu čistoty plynu, v tomto případě se jedná o 99,995 %.

Argon – jednoatomový inertní plyn, který chemicky nereaguje s ostatními chemickými prvky. Plyn je bezbarvý, nezapáchající. Argon má dobré vlastnosti pro zapálení oblouku, jakými jsou nízký ionizační potenciál a malá tepelná vodivost.

Helium – jednoatomový inertní plyn. Plyn je bezbarvý a nezapáchající. Helium je lehčí než vzduch, a proto je pro dosažení potřebné ochrany svarové lázně zvýšit průtok, to ovšem snižuje efektivitu a zvyšuje náklady. Zapálení elektrického oblouku v ochranné atmosféře helia je značně náročnější než u argonu, a to nejen kvůli vyšší tepelné vodivosti a ionizačnímu potenciálu, ale také je potřeba dvakrát vyššího napětí proudu pro zapálení oblouku. Výhodou helia je, že zvyšuje napětí na oblouku, a tím roste tepelný výkon, díky kterému je možné svařovat materiály s vysokou tepelnou vodivostí, větší tloušťkou materiálů, nebo za použití vyšších svařovacích rychlostí.

Svařovací proces je ovlivňován třemi primárními parametry:

- velikost svařovacího proudu – je volen podle tloušťky, materiálu, druhu svaru, svařovací rychlosti a polohy,
- napětí na oblouku – závisí na délce oblouku,
- rychlost svařování – je závislá na velikosti svařovacího proudu a jeho druhu.



Obr. 22 Schéma svařovací metody TIG [56]

Mezi další parametry, které ovlivňují svařový proces, patří:

- parametry elektrody (chem. složení, průměr, vyložení, vrcholový úhel),
- sklon hořáku a přidavného materiálu,
- průtok ochranného plynu,
- velikost pulzačního proudu.

Výhody svařování metodou TIG:

- velmi dobře formuje kořen i povrch svarové housenky,
- deformace a TOO jsou malé v porovnání s konvenčními metodami,
- regulace svařovacích parametrů a obsluha jsou velmi jednoduché,
- možnost svařování bez přidavného materiálu,
- velmi dobrá ochrana svarového kovu ochrannou atmosférou,
- možnost svařování tenkých materiálů.

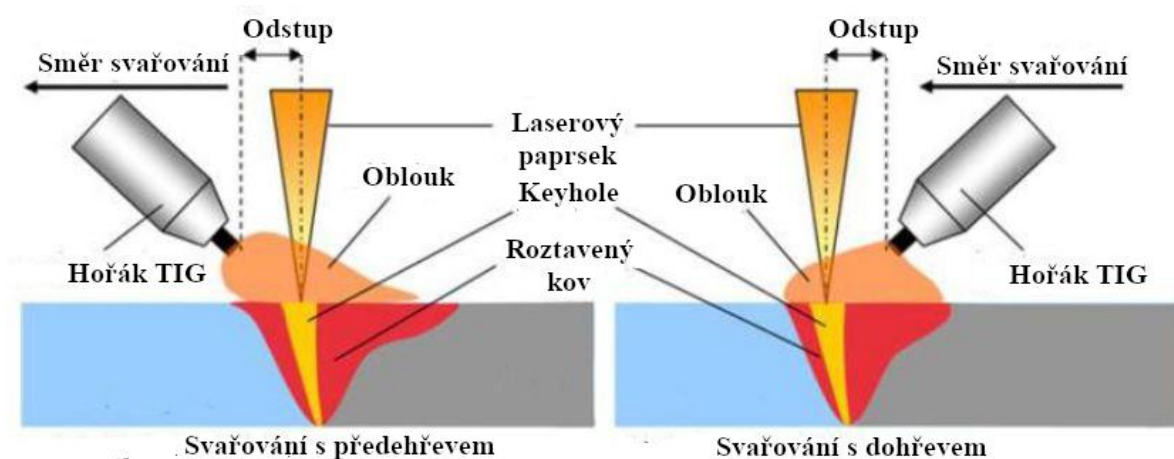
Nevýhody svařování metodou TIG:

- ❖ nízká produktivita (především ruční svařování),
- ❖ vysoká náročnost svařovacího zařízení (platí pouze pro střídavý proud).

2.3 Hybridní svařování Laser - TIG [5], [56], [57]

Pro svařování existuje, testuje se a používá se mnoho druhů hybridních procesů v oblasti laserového svařování. Všechny hybridní metody jsou vyvíjeny za účelem zvýšení produktivity, kvality nebo schopností správného svaření a jejich vzájemné spolupráce. To znamená, že použitím dvou technologií v jednom svařovacím procesu získáváme výhody obou technologií. Mezi takové metody patří např. dvoubodové laserové svařování, PALW kombinace laserového a plazmového svařování, LAGMAW spojení svařovacích metod laseru a obloukového svařování MIG/MAG a v neposlední řadě LATIG sloučení laseru a obloukové svařovací metody TIG, která bude v této kapitole blíže popsána.

V případě hybridní metody LATIG slouží jako primární zdroj tepla laser, který je charakteristický svou vysokou energetickou hustotou a slouží hlavně pro penetraci svaru. Jako sekundární zdroj tepla je zde elektrický oblouk, ten vnáší do svaru další zdroj tepla a velmi dobře formuje výslednou svarovou housenku, zlepšuje stabilitu celkového procesu a jeho účinnost. Pro využití LATIGu jsou možné dvě konfigurace hořáku TIG. Jak je zřejmé z obr. 23 jedná se o přehřev, či dohřev materiálu. V dříve prováděných výzkumech na podobných svařovaných materiálech byly prokázány lepší vlastnosti přehřevu než dohřevu, a proto byl vybrán pro experimentální část. Velikost vzdálenosti odstupu hořáku má zásadní vliv svarový šev a průnik materiálu.



Obr. 23 Schéma svařovací metody LATIG [57]

V kombinaci hybridní metody LATIG vzniká mezi jednotlivými zdroji komplikovaná fyzikální interakce, která se projeví v konfiguraci přehřevu, kdy je zlepšena teoretická absorpce laserové energie do svařovaného materiálu. V důsledku toho se zvyšuje penetrace svaru, nebo rychlost svařování. Elektrický oblouk snižuje hustotu laserové plazmy, a tím i její vlastnost absorbovat a odrážet energii laserového svazku.

Mezi výhody svařovací metody LATIG patří:

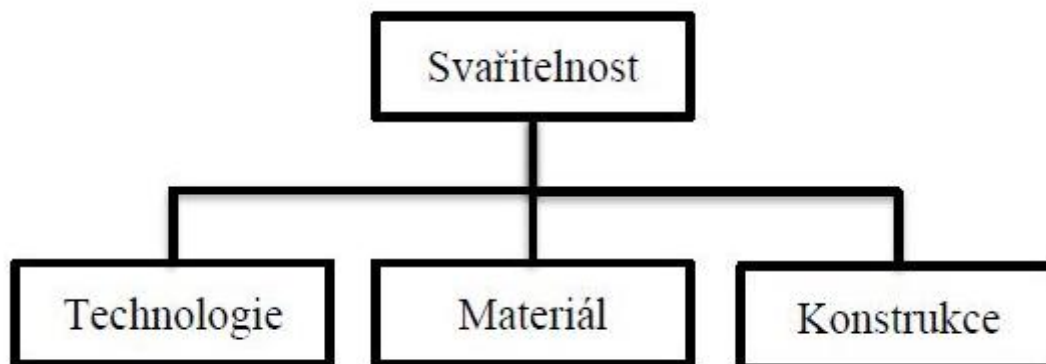
- vysoká hospodárnost a účinnost procesu,
- možnost použití větší mezery mezi svařovaným materiálem,
- zlepšení vzhledu a geometrie svaru,
- zlepšení stability elektrického oblouku v důsledku laserem vyvolaného plasmového oblaku v okolí svaru zlepšuje elektrickou vodivost, a tím i stabilitu elektrického oblouku.

2.4 Svařitelnost materiálů [28], [29], [30], [31], [33]

Svařitelnost kovových materiálů je důležitá vlastnost materiálů, která ovlivňuje možnosti výroby a cenu svaření. Svařitelnost materiálů je komplexní charakteristika a je závislá na několika parametrech obr 24. Svařitelnost je následně dělena do čtyř stupňů tab. č. 10. Dohromady vyjadřuje schopnost vytvořit kvalitní svarový spoj, který dosahuje požadovaných mechanických, životnostních a spolehlivostních parametrů. Z pohledu materiálové svařitelnosti má velký vliv chemické složení oceli. Zde je rozhodující obsah uhlíku a v různých poměrech ostatní prvky svařované oceli. Obsah oceli a ostatních prvků vyjadřuje uhlíkový ekvivalent.

Svařitelnost je dána následujícími parametry:

- technologická svařitelnost – závisí na druhu použité technologie,
- materiálová svařitelnost – odvíjí se od vlastností svařovaného materiálu (chemické složení, tloušťka, způsob výroby, tepelné zpracování),
- konstrukční svařitelnost – v závislosti na správně zvolené konstrukci, kladení a rozmístění jednotlivých svarů.



Obr. 24 Svařitelnost kovu [30]

Tab. 10 Rozdělení skupin svařitelnosti [31], [33].

Stupeň svařitelnosti	Označení	Rozsah záruky	Příklad použití
Zaručená	1a	Zaručuje svařitelnost při svařování za okolních teplot až 0 °C	Pro svary namáhané dynamicky i při nízkých teplotách
Podmínečně zaručená	1b	Zaručuje svařitelnost při dodržení předem daných podmínek uvedených v normě jakosti oceli, např. předehřev: neleg. Oceli 150 až 250 °C, leg. Oceli 250 až 400 °C	Pro staticky namáhané svary
Dobrá	2	Nezaručuje svařitelnost, ale tyto oceli dávají ve většině případů vyhovující svarové spoje	Opravné svary, druhořadé staticky namáhané konstrukce
Obtížná	3	Zpravidla nelze dosáhnout vyhovující jakosti svarových spojů ani při dodržení zvláštních opatření při svařování	Nedoporučují se používat na svařování, pouze pro nutné opravy

2.4.1 Uhlíkový ekvivalent [32], [30], [29]

Význam chemického složení svařovaného materiálu na svaření je zásadní. Nejčastěji se vliv chemického složení vyjadřuje uhlíkovým ekvivalentem CE, který zahrnuje jednotlivé legující prvky k poměru k velikosti vlivu na zakalení oceli. Jedná se především o struktury martenzitu a spodního bainitu ve svarovém kovu a TOO. Dále vyjadřuje sklon ke vzniku studených trhlin. Vznik studených trhlin je závislý na velikosti vneseného tepla vztah (2.1), množství difuzního vodíku ve svaru, tloušťce a chemickém složení materiálu. Vztahy pro uhlíkové ekvivalenty jsou empiricky odvozené a platí pouze pro obloukové svařování,

jako je např. svařování pod tavidlem nebo obalovanou elektrodou. Pro použití metod laseru či LATIGu jsou tyto uhlíkové ekvivalenty pouze orientační. Vhodnost materiálu ke svařování je tím horší, čím je uhlíkový ekvivalent vyšší. Na základě uhlíkového ekvivalentu a velikosti tepelného příkonu se volí použití možného předehřevu, a pokud je pro svaření předehřev nutný, určí se teplota předehřevu pro danou ocel. Uhlíkový ekvivalent CE je vhodný pro ocel s obsahem C nižším než 0,22 %, Mn = 1,6 %, Cr = 1 %, Ni = 3 %, V = 0,14 %, Cu = 0,3 %. Obsah jednotlivých prvků se dosazuje v hm. %.

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \text{ [%]} \quad (2.1)$$

Kde: s – tloušťka materiálu [mm]

Uhlíkový ekvivalent navržený Mezinárodním svářečským institutem (IIW) (2.2) platí pro feritické oceli s C < 0,25 %. Tento uhlíkový ekvivalent je také vhodný pro jemnozrnné, nelegované a nízkolegované oceli. Uhlíkový ekvivalent CE je vhodný pro oceli s chemickým složením v rozmezí nebo do hm. % legujících prvků: C = 0,05 až 0,25 %, Si = max. 0,8 %, Mn = max. 1,7 %, Cr = max. 0,9 %, Cu = max. 1 %, Ni = max. 2,5 %, Mo = max. 0,75 %, V = max. 0,2 %. Nepoužívá se však pro určení uhlíkového ekvivalentu ocelí, které obsahují bór. Při svařování různých druhů ocelí s odlišným uhlíkovým ekvivalentem pracujeme s vyšší hodnotou. V případě, kdy je znám pouze obsah C a Mn, přičteme k uhlíkovému ekvivalentu 0,03, hodnota zahrnuje vliv ostatních prvků.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \text{ [%]} \quad (2.2)$$

Dle ČSN EN 1011-2 se počítá uhlíkový ekvivalent CET podle rovnice (2.3) a je vhodný pro materiály s chemickým složením C = 0,05 až 0,25, Si = max. 0,8 %, Mn = 0,5 až 1,9 %, Cr = max. 1,5, Cu = max. 0,7 %, Ni = max. 2,5 %, Mo = max. 0,75 %, Ti = max. 0,12 %, V = max. 0,18 %, B = max. 0,005 %, Nb = max. 0,06 %.

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ [%]} \quad (2.3)$$

2.4.2 Předehřev materiálu [29], [30], [32], [37], [38], [39], [66]

Svařovaný materiál je v závislosti na svém chemickém složení náchylný např. ke vzniku studených trhlin. V takových případech je do svařovacího procesu přidána další operace předehřev, dohřev či kombinace předehřevu a dohřevu materiálu. Pro stanovení teploty předehřevu je možné použít několik variant. Mezi tyto varianty patří výpočty podle empirických vztahů, nebo odečtením z ARA diagramu. Tyto a další metody předehřevu popisuje norma ČSN EN 1011 - 2. Pro posouzení tohoto problému bylo použito níže popsanych vztahů. Výpočet předehřevu je opět pouze orientační, a to ze stejného důvodu jako v případě uhlíkového ekvivalentu. Předehřev svařovaného materiálu přidáváme z níže uvedených důvodů:

- difuze vodíku je příznivější díky příznivějším strukturám,
- difundovaný vodík má více času na opuštění svarového spoje,
- ve svarovém kovu vznikne nižší teplotní gradient, a tím dojde ke snížení napětí ve svarovém kovu,
- riziko zakalení TOO a svarového kovu je menší díky nižší rychlosti ochlazování svaru.

Tepelný příkon vztah 3.3 je definován dle normy ČSN EN 1011-1 a slouží jako kritérium pro určení vhodnosti předehřevu metody podle normy ČSN EN 1011-2 metoda B. Dále se používá pro odhalení náchylnosti na zakalení či vzniku trhlin. V některých případech je nutné správně regulovat ochlazování ze svařovací teploty. V některých případech je nutné regulovat teplotu ochlazování, tj. dosáhnout požadované teploty v požadovaném čase.

Tepelná účinnost přenosu tepla je volena v závislosti na konkrétní metodě svařování. Tepelný příkon je možné označit za významný faktor, který v průběhu svařování ovlivňuje vlastnosti svaru a TOO feritických ocelí a feriticko-austenitických korozivzdorných ocelí. Dalším neméně důležitým faktorem tepelného příkonu je teplotně časový cyklus vznikající během svařování, který ovlivňuje vlastnosti výsledného svaru.

Tepelný příkon pro metodu laser:

$$Q_{Laser} = \frac{k_{Laser} \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = \frac{k_{Laser} \cdot P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (2.4)$$

Tepelný příkon pro metodu LATIG:

$$Q_{LATIG} = Q_{Laser} + \frac{k_{TIG} \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} [kJ \cdot mm^{-1}] \quad (2.5)$$

kde: Q – vnesené teplo [kJ·mm-1]

k – tepelná účinnost přenosu tepla [-]

U – svařovací napětí zdroje [V]

I – svařovací proud zdroje [A]

v – rychlost svařování [mm·min-1]

P – výkon svařovacího zdroje [W]

Hodnota teploty předehřevu podle Séfariána se určí podle níže uvedených vztahů (2.6 až 2.9). Výpočet je vhodný pro nízkolegované oceli s obsahem uhlíku větším než 0,1 hm. %.

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} [hm. \%) \quad (2.6)$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c \quad (2.7)$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (2.8)$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} [^{\circ}C] \quad (2.9)$$

Dle normy ČSN EN 1011-2 metoda B se určí teplota předehřevu a vhodnost materiálu podle níže uvedených parametrů a výpočtem podle vztahů 2.8 až 2.12 následovně:

konstrukční ocel s R_m do 1000 MPa,

$CET = 0,2 - 0,5 \%$,

$d = 10 - 90 \text{ mm}$,

$HD = 1 - 20 \text{ ml} \cdot 100\text{g}^{-1}$,

$Q = 0,5 - 4 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$.

Vliv chemického složení svařované oceli:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.10)$$

Vliv tloušťky svařovaných materiálů:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.11)$$

kde: d - tloušťka [mm]

Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu:

$$T_{pHD} = 62 \cdot HD^{0,35} - 100 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.12)$$

kde: HD - obsah difuzního vodíku [$\text{ml} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$]

Vliv tepelného příkonu:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 [^{\circ}\text{C}] \quad (2.13)$$

kde: Q - tepelný příkon [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

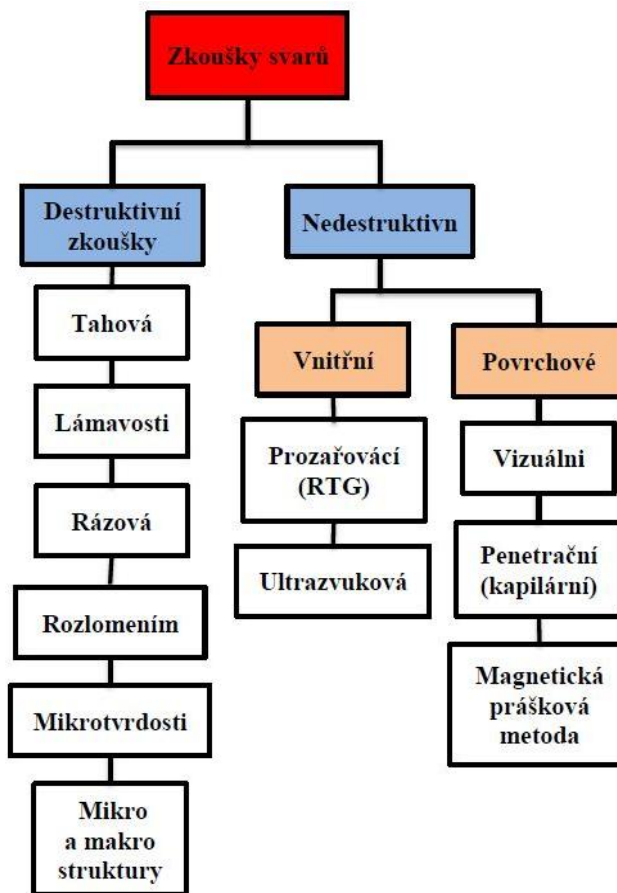
Teplota předehřevu je součet jednotlivých parametrů:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} [^{\circ}\text{C}] \quad (2.14)$$

2.4.3 Vady svarů [30], [40], [41], [42], [29]

Svařovací proces roztaví základní materiál ve svarovou lázeň, která následně ztuhne a vytvoří se nové struktury s rozdílnými vlastnostmi, než jsou ty, které má základní materiál.

To ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti svařence, proto jsou na svary kladeny vysoké požadavky a existuje mnoho testů, jak tuto kvalitu ověřit obr. 25. Mezi takové testy patří: těsnost, estetika, korozní odolnost svaru ad. Mezi nejdůležitější kritéria patří vady svarů, které mohou být nebezpečnými koncentratory napětí a v závislosti na druhu konstrukce a jejího zatížení bude mít výsledný vliv na vyhovění požadovaným kritériím. Svarové vady mohou být viditelné, anebo skryté. Skryté vady je nutné odhalit pomocí speciálních metod, přístrojů či laboratorních zkoušek. Tuto problematiku popisuje norma ČSN EN ISO 13919 – 1 Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Směrnice pro určování jakosti – Část 1: Ocel. Avšak obecně lze tvrdit, že každý svar obsahuje vady, záleží však na jejich velikosti, počtu a případném vlivu na konečný stav konstrukce. Při použití jakékoliv svařovací technologie vznikají ve svarovém kovu a TOO



Obr. 25 Rozdělení svarových zkoušek [41]

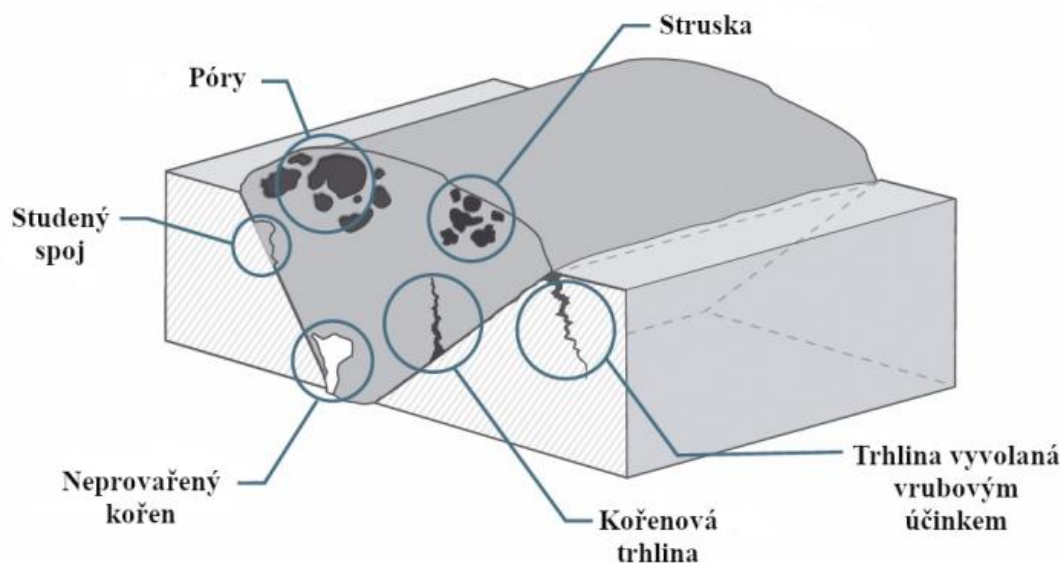
svarové vady, které jsou rozděleny podle tvaru a podle polohy, kde se nachází. Volba svařovací technologie a výběr svařovaného materiálu má významný vliv na vznik vad. Na obr. 26 je několik zřetelných druhů vad, některé z nich budou blíže popsány.

Vady rozdělené podle tvaru:

- bodové – malé kulovité vměstky a mikropóry,
- plošné - především neprovařené části, studené spoje, trhliny a mikrotrhliny,
- prostorové – bubliny a póry, staženiny, vměstky a zápaly.

Vady rozdělené podle polohy:

- povrchové – např. mikrotrhliny, neprovařený kořen, póry, studené spoje, trhliny,
- vnitřní – neprovařený kořen, staženiny, studené spoje, staženiny, plynové dutiny a póry.



Obr. 26 Vady svarů [42]

Bubliny a póry - Původ těchto vad je ve vyloučení plynů ve svarové lázni, které během svařovacího procesu nestihnou uniknout. Hluky drobných bublin jsou daleko nebezpečnější než osamocené bubliny, a to z důvodu spojení bublin do lomové plochy. Příčiny vzniku bublin jsou nejčastěji z vlhkosti, z nečistot a z dezoxidačních procesů ve svarovém kovu. K zamezení vzniku bublin a pórů je používán předehřev očištění svařovaných hran a dokonalé vysušení přídavných materiálů.

Neprovařený kořen vzniká, pokud svarové plochy v kořenu nejsou nataveny a spojeny svarovým kovem. Jedná se o velmi nebezpečný koncentrátor napětí, který oslabuje celý svar.

Vruby a zápaly se vyskytují zejména na okrajích svaru. Jedná se o ostrá natavená prohloubení mezi základním materiálem a svarovým kovem, a proto se řadí mezi povrchové vady. Vruby a zápaly jsou nebezpečné především pro cyklické namáhání, v těchto místech se šíří a vznikají trhliny.

Studené spoje vznikají nedokonalým tavným spojením mezi svarovým kovem a základním materiálem. Studené spoje se vytvářejí při zvolení špatných svařovacích parametrů, mezi které patří: nízký svařovací proud, nesprávné vedení elektrody či hořáku a vysoká rychlost svařování.

Vměstky vznikají buď z kovu, ze strusky nebo z oxidu příslušného prvku. Kovové vměstky vznikají nejčastěji při vysokých proudech svařování metodou TIG, a to v momentě dotyku tavné lázně a wolframové elektrody. Struskové vměstky vznikají, pokud je nedokonale odstraněna struska mezi svařovanými housenkami, přičemž platí podmínka, že struska předbíhá elektrický oblouk. Oxidické vměstky vznikají při nedokonalém očištění svařovaného materiálu. Vyskytují se u hliníku a hořčíku.

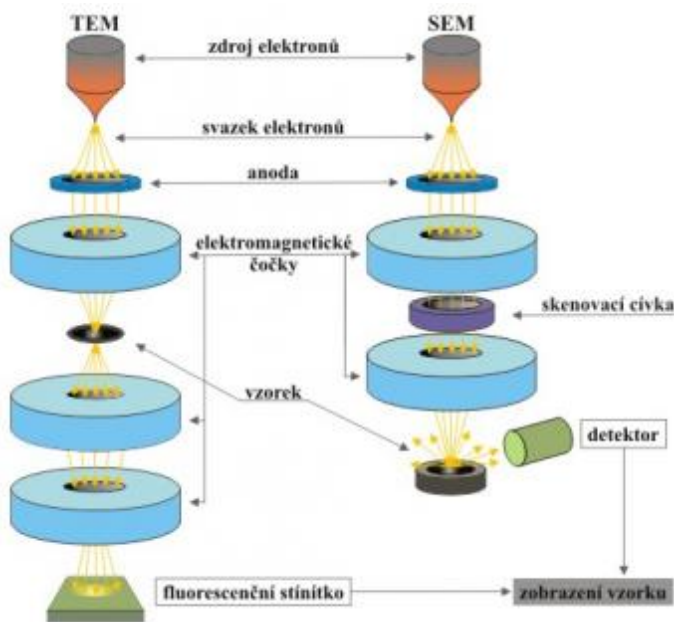
2.5 Elektronová mikroskopie [59],[60],[29],[61],[62],[65],[32],[72],[73]

Pro vysvětlení funkce a podstaty elektronové mikroskopie bude proveden analogický rozbor světelné a elektronové mikroskopie. Na obr. 27 je viditelný rozsah jednotlivých druhů mikroskopů. Dále bude proveden rozbor základního rozdělení a některých zobrazovacích metod, které byly použity v experimentální části.



Obr. 27 Rozsah jednotlivých mikroskopů [59]

Světelný mikroskop používá pro zobrazení elektromagnetické vlnění ve viditelné oblasti spektra a skleněné čočky, které pro pozorování zkoumaných předmětů používají viditelné světlo, což sebou přináší omezení v podobě difrakčního limitu. Nedílnou výhodou světelné mikroskopie je sledování vzorku v reálném čase. V elektronové mikroskopii např. u skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) může trvat rastrování i v řádech několika desítek minut. Elektronová mikroskopie používá pro zobrazení pozorovaných předmětů elektrony urychlené elektrickým polem a namísto skleněných čoček využívá čočky elektromagnetické. Pro zamezení vzájemného ovlivňování atmosférou, v jejímž důsledku by elektrony měnily dráhu, se ve většině případů svazek elektronů a pozorovaný vzorek nachází ve vakuu. Výjimku tvoří environmentální elektronová mikroskopie, kde se v komoře mikroskopu nachází páry. Výstupy z elektronové mikroskopie jsou charakteristické velkou hloubkou ostroty obrazu a vysokou rozlišovací schopností a dalšími. V důsledku toho je možné provést detailnější posouzení základních strukturních fází a složek, mezi které patří: vytvřující precipitáty, chemické sloučeniny o velikostech 1 až 2 nm a karbidické a nitridické částice. Dále je možné provádět materiálové analýzy.



Obr. 28 Rozdělení elektronové mikroskopie [59]

V případě použití metody transmisního elektronového mikroskopu (TEM) je možné studovat rozložení dislokačních čar, čímž je získána střední dislokační hustota. Zdroje elektronů jsou děleny do dvou základních skupin. Jedná se o autoemisní zdroje, které jsou emitovány ze studeného wolframového vlákna vyleptaného do hrotu, nebo termoemisní zdroje elektronů, kde jsou elektrony emitovány při průchodu elektrického proudu, při kterém dochází k zahřátí vlákna a úniku elektronů.

Elektronové mikroskopy se dělí do dvou kategorií podle způsobu zobrazování obr. 28:

SEM – Skenovací elektronový mikroskop dovoluje pozorovat vzorky, které jsou limitovány pouze velikostí vakuové komory, do které jsou umístěny. Metoda má velmi univerzální využití a získané výsledky jsou jasně interpretovatelné. SEM je používána převážně pro pozorování povrchu vzorku. Pro zobrazení je použit pohybující se svazek elektronů. Na základě odražených sekundárních elektronů, zpětně odražených elektronů, Augerových elektronů a rentgenového záření vznikne fyzikální signál, který je následně zpracován detektory, které ho poté převedou na elektrický signál. Elektrický signál je následně převeden do obrazu. Pohyb svazku je způsoben dvěma navzájem kolmými systémy vychylovacích cívek, které mohou být v několika stupních. V první řadě cívek kondenzorová a druhá rastrovací. Z rastrovacího generátoru je přivedeno periodické napětí, které umožní pohyb svazku na vzorku řádek po řádku.

Výhody metody EDX/EDS:

- celé spektrum je načítáno současně,
- rychlá analýza,
- levnější než metoda WDS.

- špatné rozlišení 130 – 150 eV na kanál,
- vysoká mez detekce 0,1 – 1 hm.%,
- možnost kombinace prvků, např. Mo a S, As a Mg, Na a Zn.

Sekundární elektrony (SE) - Mezi sekundární elektrony jsou řazeny elektrony o nízké energii okolo 0 až 50 eV, tím se mohou uvolňovat pouze z tenké vrstvy pod povrchem 3 až 10 nm. Sekundární elektrony vznikají v procesu nepružných srážek. Tato metoda lépe

rozlišuje povrch a strukturu než metoda BSE a poskytuje rozlišovací schopnost 5 až 15 nm. Uvolněné elektrony mají informaci o povrchu vzorku.

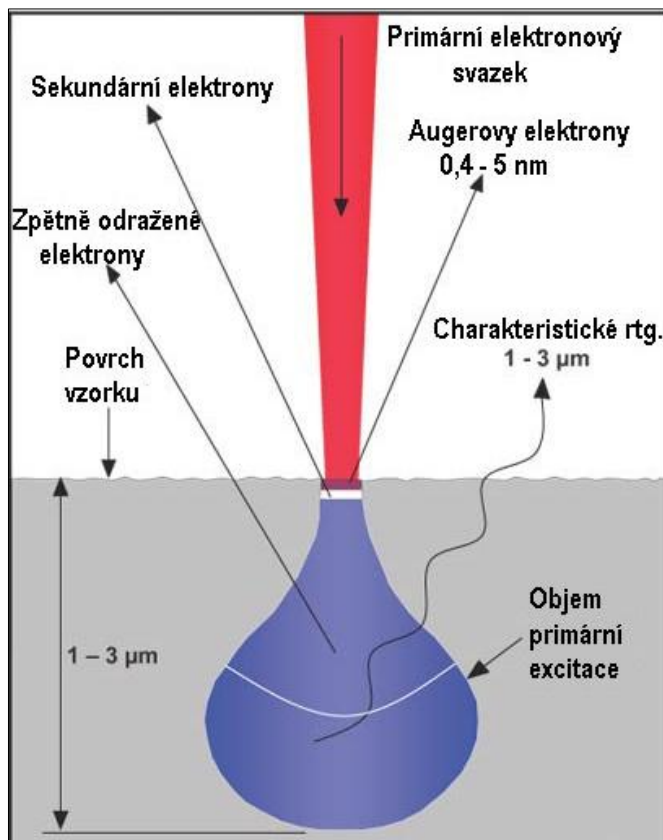
Sekundární elektrony je možné rozdělit do tří skupin:

SE1 – uvolňují se pouze z místa dopadu primárních elektronů. Jedná se o nejvhodnější sekundární elektrony.

SE2 – sekundární elektrony, které jsou zpětně odraženy elektrony v blízkosti dopadové plochy vzorku při upouštění zpětně odražených elektronů.

SE3 – jsou sekundární elektrony detekované po dopadu či odražení elektronů ze stěny komory.

Zpětně odražené elektrony (BSE) – Tyto elektrony mají vyšší energii než SE, v důsledku čehož jsou emitovány z větší hloubky vzorku, tj. až z několika stovek nm. Zpětně odražené elektrony vznikají v důsledku střetu atomů vzorku a dopadajícího svazku elektronů. Emitace elektronů vzorku je ve větším objemu než u SE, a tím dochází ke zhoršení rozlišení, než je tomu v případě metody SE. Rozlišovací schopnost je 50 až 200 nm. Pro detekci odražených elektronů se nejčastěji používá polovodičových detektorů. Metoda BSE rozlišuje fáze pozorovaného vzorku a složení materiálu. Na základě zpracování signálu jsou získány dva druhy kontrastu: materiálový a topografický.



Obr. 30 Rozsah jednotlivých mikroskopů [63]

Pro potřeby experimentu diplomové práce a kombinaci vytíženosti lidských a přístrojových zdrojů bylo využito skenovacího elektronového mikroskopu S9000. Pro detekci byl použit detektor In-beam SE, který pracuje na principu sekundárních elektronů a rozlišuje povrch vzorku lépe než detektor pracující na principu zpětně odražených elektronů. Pro materiálovou analýzu a prvkové mapy byla použita metoda EDX.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci experimentu bylo svařeno 12 vzorků různých materiálů. Pro svařování byly použity dvě technologie svařování: laser a hybridní svařování LATIG. Vzorky byly svařeny v laboratoři laserového svařování na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd v Brně (ÚPT). Zde byly následně zhotoveny metalografické výbrusy a rozbor makrostruktury a mikrostruktury. Dále bylo provedeno měření mikrotvrdosti na všech 10 vzorcích. Tahová zkouška není v tomto případě potřebná, protože se vzorky v každém případě přetrhnou v materiálu s nižší mezí pevnosti. V úvahu dále připadají zkouška Erikson pro hodnocení hlubokotažnosti svařovaných plechů, únavové zkoušky a zkouška rázem v ohybu. Zkoušku Erikson nelze uskutečnit, a to z důvodu jiné volby rozměrů svařovaného materiálu. Únavovou a rázovou zkoušku není možné provést kvůli velké náročnosti a vytíženosti laboratoří a pracovišť. Vzorky byly dále podrobeny chemické analýze EDX ve společnosti TESCANA, kde byly následně vyhotoveny snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).

3.1 Svaření vzorků [18], [19], [70], [75]

Před samotným svařením vzorků byly pro Domex 460 MC a obtížněji svařitelné oceli Domex 700 MC a S355J2 provedeny orientační výpočty uhlíkových ekvivalentů CET a CE a teplot přehřevu podle Sefariána. Z kapitoly 2.4.1 byly vybrány vztahy pro uhlíkové ekvivalenty a teploty přehřevu, které se nejvíce podobají svařovaným materiálům. Vzorově byl výpočet proveden pro Domex 460 MC. Hodnoty chemického složení byly dosazeny z materiálových atestů příloha 1. Výsledky pro Domex 700 MC a S355J2 jsou v tab. 11.

Uhlíkový ekvivalent

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad (2.2)$$

$$CET = 0,1 + \frac{1,5 + 0}{10} + \frac{0 + 0}{20} + \frac{0}{40} = 0,25 \quad [\%]$$

Uhlíkový ekvivalent Y

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} \quad [\%] \quad (2.3)$$

$$CE = 0,1 + \frac{1,5}{6} + \frac{(0 + 0 + 0,2)}{5} + \frac{(0 + 0)}{15} = 0,39 \quad [\%]$$

Z výpočtů uhlíkových ekvivalentů pro obloukové svařování vyplývá, že oceli jsou dobře svařitelné a není zapotřebí zvláštních opatření pro svaření mimo S355J2, v jejímž případě by byl vhodný přehřev materiálu. Tato skutečnost ovšem nemusí platit pro svaření laserem, kde je čas ochlazování $t_8/5$ 10x rychlejší než při obloukovém svařování. Z toho vyplývá, že i u těchto ocelí svařených laserem se mohou vyskytnout martenzitické fáze, které jsou ve svarovém kovu a TOO nepřijatelné pro další technologické operace TB. V dalších částech práce bude provedeno srovnání obou metod a vyhodnocení z hlediska makrostruktury, mikrostruktury a mikrotvrdosti, na jejichž základě budou odhaleny důsledky užití svařovací metody na mechanické vlastnosti a strukturu svařovaného materiálu.

Tab. 11 Vypočítané parametry pro Domex 700 MC a S355J2.

Materiál	Uhlíkový ekvivalent		Teplota předehřevu
	CET	CEV	
Domex 700 MC	0,39 %	0,26 %	64 °C
S355J2	0,36 %	0,46 %	127°C

Po svaření vzorků byly vypočítány hodnoty vneseného tepla při svařování jak pro laserovou metodu, tak pro LATIG. Do vztahů z kapitoly 2.4.2 byly dosazeny hodnoty z experimentálního svaření vzorků. Do vztahu Q_{Laseru} byla zvolena hodnota k jako střední hodnota 0,83, pro kterou platí: tepelná účinnost přenosu tepla za předpokladu penetračního režimu svařování a v případě, že laserový paprsek projde skrz materiál, je koeficient $k_{\text{Laser}} = 0,8 \div 0,85$. Při svařování ploch, kdy není požadavkem plná penetrace materiálu, je koeficient $k_{\text{Laser}} = 0,6$. Výpočet vneseného tepla pro LATIG je podobný jako u laseru. Jen pro k_{TIG} platí 0,6.

$$Q_{\text{Laser}} = \frac{k_{\text{Laser}} \cdot P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (2.4)$$

$$Q_{\text{Laser}} = \frac{0,83 \cdot 1400 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 0,0581 \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

$$Q_{\text{LATIG}} = Q_{\text{Laser}} + \frac{k_{\text{TIG}} \cdot U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.5)$$

$$Q_{\text{LATIG}} = 0,0581 + \frac{0,6 \cdot 16 \cdot 40 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 0,0773 \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

Výpočet předehřevu podle Sefariána

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (Mn + Cr) + 20 \cdot Ni + 28 \cdot Mo}{360} \text{ [hm. \%]} \quad (2.4)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot 0,1 + 40 \cdot (1,5 + 0) + 20 \cdot 0 + 28 \cdot 0}{360} = 0,26 \text{ [hm. \%]}$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c \quad (2.5)$$

$$C_s = 0,005 \cdot 3 \cdot 0,26 = 3,9 \cdot 10^{-3}$$

$$C_p = C_c + C_s \quad (2.6)$$

$$C_p = 0,26 + 3,9 \cdot 10^{-3} = 0,2639$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 0,25} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (2.7)$$

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{0,2639 - 0,25} = 41,26 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Vypočítaná teplota přehřevu byla 41,26 °C, která byla pro jasnější přehlednost zaokrouhlena na teplotu 42 °C. To je velmi nízká hodnota a s účastí malé tloušťky materiálu by za normálních podmínek svařování nebyl přehřev potřebný. Jaké mechanické a strukturní rozdíly svařovaných materiálů budou mít v závislosti na použití přehřevu, bude zjištěno při vyhodnocení mikrostruktury a mikrotvrdosti.

Pro svaření vzorků byl použit vláknový pevnolátkový laser Yb:YAG Laser – IPG YLS 2000 s maximálním výkonem 2000 W. K manipulaci laserové hlavy a svařovacího zdroje TIG – Fronius MagicWave 1700 byl využit robotický manipulátor IRB 2400/16 od společnosti ABB.

Pro svaření vzorků laserem byly nastaveny tyto parametry:

- svařovací rychlost 20 mm·s⁻¹,
- výkon laseru 1400 W,
- fokusační vzdálenost čočky 200 mm,
- průměr spotu 400 μm,
- průměr vlákna 200 μm.

Pro svaření vzorků LASTIG bylo ponecháno nastavení z předchozího svařování laserem, ke kterému byly nastaveny tyto parametry přehřevu TIG:

- ochranná atmosféra argonu 16,7 l·min⁻¹,
- odstup elektrody TIG od laseru 20 x 20 mm,
- stejnosměrný proud 40 A,
- napětí 16 V.

Výše uvedené parametry byly zvoleny na základě následného jednoznačného porovnání obou metod.

Pro svaření vzorků byl zvolen následující postup, kde je proveden bodový svar na jedné straně svařovaného materiálu a následně proveden svar z druhé strany, a to proto, aby se svarová mezera mezi oběma materiály v důsledku tepelných deformací nerozevřela. To by totiž způsobilo znehodnocení svaru. Pro svařování laserem je nutné velmi pečlivě dodržovat mezeru mezi svařovanými materiály. V případě svařených vzorků číslo 6 a 7 bylo svaření kvůli nevyhovujícímu vzhledu a neprovaření vzorků vyhodnoceno jako nevyhovující, a proto byly vzorky svařeny znovu (vzorek 6a a 7a). Na obr. 31 je vzorek 6, na kterém se objevil problém v přeskakujícím napětí na elektrodě TIG, který způsobil kmitavý povrch svarů. Tento problém mohl být způsoben nestabilitou elektrického oblouku při vysoké svařovací rychlosti laseru nebo změnou tvaru elektrického oblouku v důsledku obalení elektrody nečistotami. Po přebroušení wolframové elektrody a svaření dalších vzorků již tento stav nenastal obr. 32. U vzorku 7 obr. 33 se nepovedlo téměř vůbec provařit svařovaný materiál, a proto byl svar opakován s novým materiálem. Pohledový výsledek po svařování byl znatelně lepší obr. 34, avšak ne dostatečný.

Ve vědecké práci Mikrostruktura a mechanické vlastnosti hybridního svařování LATIG vysoko pevnostních ocelí byl svařen Domex 460 s DC01 při použití stejných podmínek vyjma výkonu laseru, který byl 1500 W (tedy o 100 W vyšší než u svaření vzorků z tohoto experimentu). Z toho by se mohlo na první pohled zdát, že zvýšení výkonu bude mít za následek provaření svaru. Svou roli zde ovšem hraje mnoho faktorů, např. rozdílná tepelná vodivost svařovaných materiálů nebo množství Mn. Proč je však pro materiál DC01 potřebný větší svařovací výkon než pro ostatní podobné materiály? To zatím není možné jednoznačně určit.

Tab. 12 Vzorky svařené laserem.

Vzorek	Svařený materiál
1	Domex 460 MC – Domex 700 MC
2	Domex 460 MC – S355J2
3	Domex 460 MC – DC01
4	Domex 460 MC – Domex 460 MC

Tab. 13 Vzorky svařené metodou LATIG.

Vzorek	Svařený materiál
5	Domex 460 MC – Domex 700 MC
6	Domex 460 MC – S355J2
6A	Domex 460 MC – S355J2
7	Domex 460 MC – DC01
7A	Domex 460 MC – DC01
8	Domex 460 MC – Domex 460 MC



Obr. 31 Svařený vzorek 6 před přebroušení elektrody



Obr. 32 Svařený vzorek 6A po přebroušení elektrody



Obr. 33 Svařený vzorek 7 bez provaření kořene



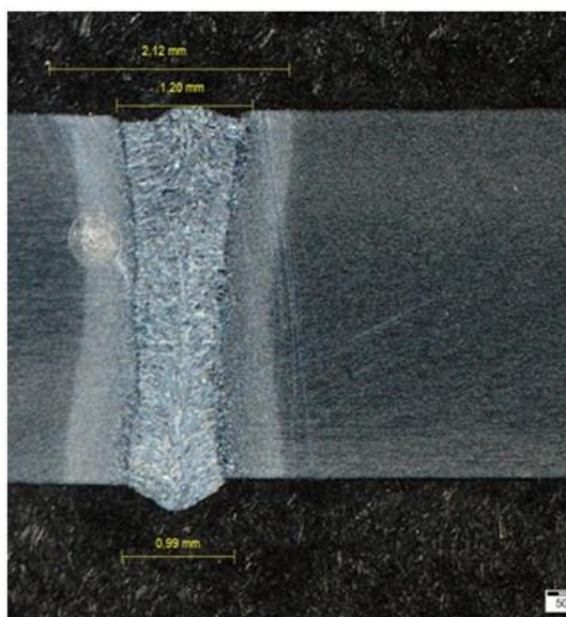
Obr. 34 Svařený vzorek 7A bez provaření kořene

3.2 Makrostruktura [29]

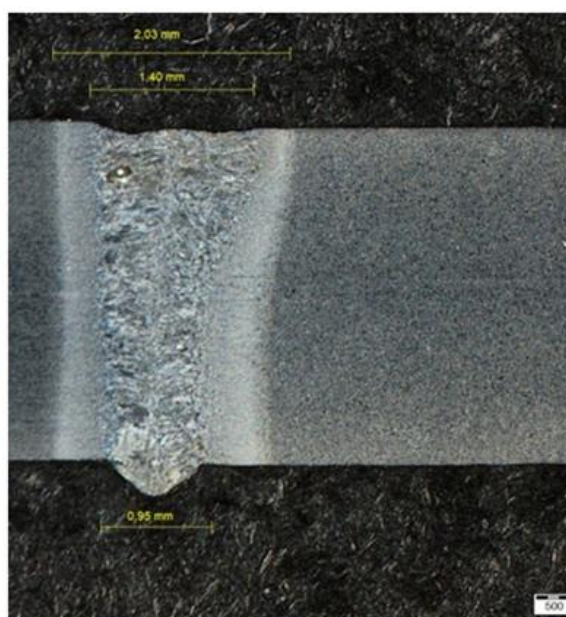
Pro vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury je nutné vytvořit metalografické výbrusy vzorků, a proto byly vzorky nařezány a zalisovány do plastu. Vytvoření metalografických vzorků probíhalo na ÚPT v Brně v metalografické laboratoři. Vzorky byly připravovány podle normy ČSN EN ISO 176 39. Vytvořené vzorky musí obsahovat svarový kov, obě TOO a neovlivněný svařovaný materiál. Z vytvořených vzorků se vyhodnocuje:

- tvar svaru,
- provaření kořene,
- šířka TOO,
- defekty ve svarovém kovu (studené spoje, trhliny, vměstky, póry).

Snímky makrostruktury byly pořízeny mikroskopem Olympus SZ761 za pomoci softwaru Olympus stream basic. Na makrostruktuře je jasně patrné použití laseru, či LATIGu, a to hlavně díky vnesenému teplu do svařovaného materiálu. Při použití hybridní metody LATIG je TOO mnohem větší než u laseru. Z makroskopického snímku je jasně patrné, zda je svar dostatečně provařený. Neprovařené vzorky jsou znatelné u vzorků 3,6 a 6A na obr. 39, 40 a 42. Jedná se o materiály Domex 460 MC a DC01. U metody LATIG je rovněž patrná mnohem větší pórovitost než u svařovací metody laser. Snímky v plném rozsahu jsou uvedeny v příloze 2.



Obr. 35 Vzorek 1



Obr. 36 Vzorek 5

Na obr. 35 je vidět jasná žlutá kružnice. S největší pravděpodobností se jedná o nečistotu, nebo vadu při výrobě metalografického výbrusu. Na obr. 36 je jasně patrný ostrý přechod mezi svarem a základním materiálem. V případě cyklického namáhání součásti by mohl tento jev pracovat jako koncentrátor napětí a výrazně by snižoval únosnost materiálu. V obr. 36 je vidět pór v horní části svarů.

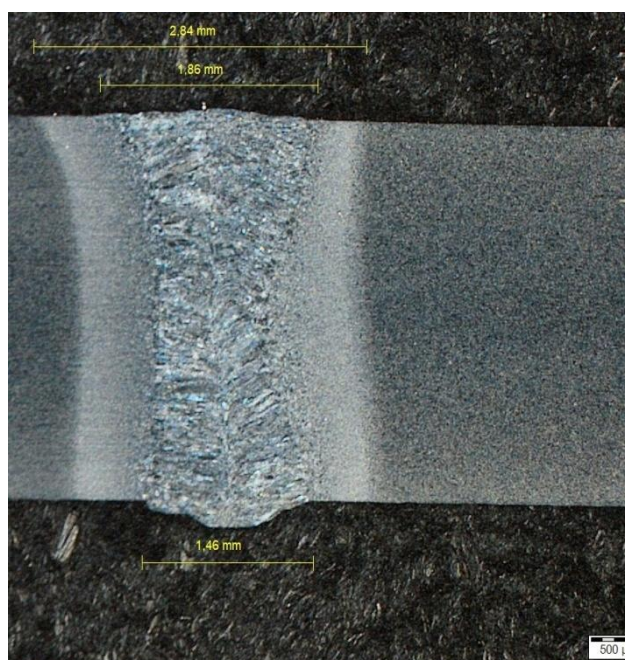
Tab. 14 Rozměry svaru.

Rozměr [mm]	Vzorek									
	1	2	3	4	5	6	6A	7	7A	8
TOO	2,12	2,03	2,04	1,94	3,14	2,84	2,83	2,77	2,96	2,79
Svar	1,20	1,40	1,40	1,25	1,88	1,86	1,80	1,87	2,10	1,73
Kořen	0,99	0,95	0,91	1,02	1,09	1,46	1,55	0,84	0,90	1,39
Hloubka	-	-	2,60	-	-	-	-	2,64	2,46	-

Svar a TOO jsou výrazně větší v případě metody LATIG než u laseru. V rámci kořenu se velikost takřka neliší od 0,91 do 1,09 mm, kromě vzorků 6, 6A a 8. Jedná se o materiál S355J2 a Domex 460 MC, kde je šířka kořenu výrazně větší, a to od 1,39 do 1,55 mm než u ostatních vzorků svařených metodou LATIG. V průběhu svařování kombinace materiálů Domex 460 MC a DC01 nenastala ani v jednom případě kompletní penetrace svaru. Rozsah hloubky svaru je od 2,46 do 2,64 mm. Hodnoty naznačují, že přídavné teplo z TIGu nemá zásadní vliv na hloubku svaru, má však zásadní vliv na šířku hlavy svaru a TOO.

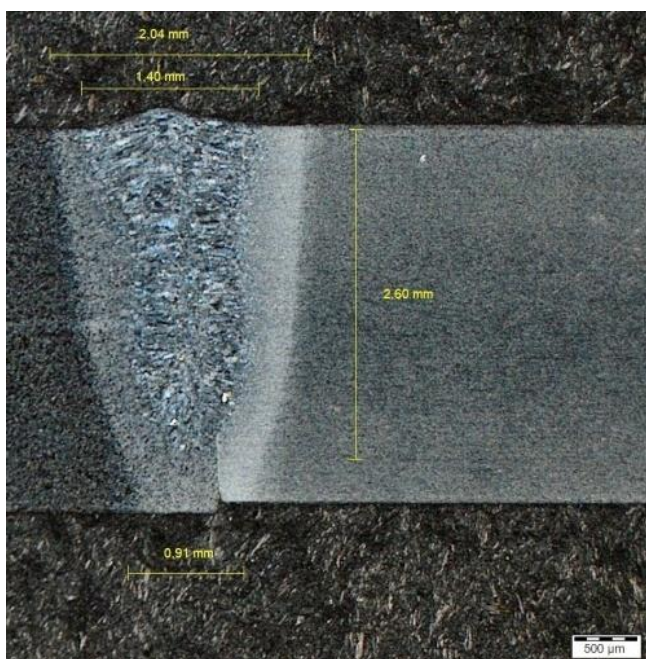


Obr. 37 Vzorek 2

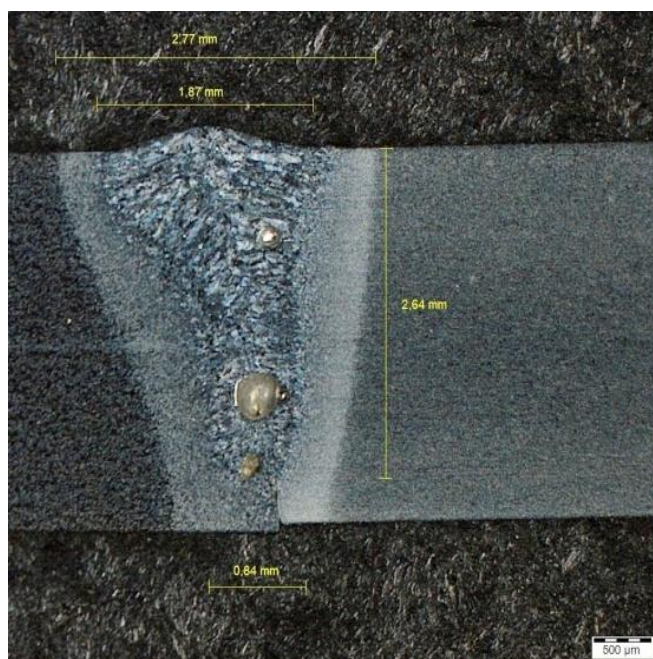


Obr. 38 Vzorek 6

Na obr 37 je v horní polovině pór, v tomto případě je vrchní část svaru bez ostrých přechodů mezi svarem a materiálem. V případě obr. 37 a 38 je patrná větší TOO, která koresponduje s vyšším vneseným teplem metodou LATIG.

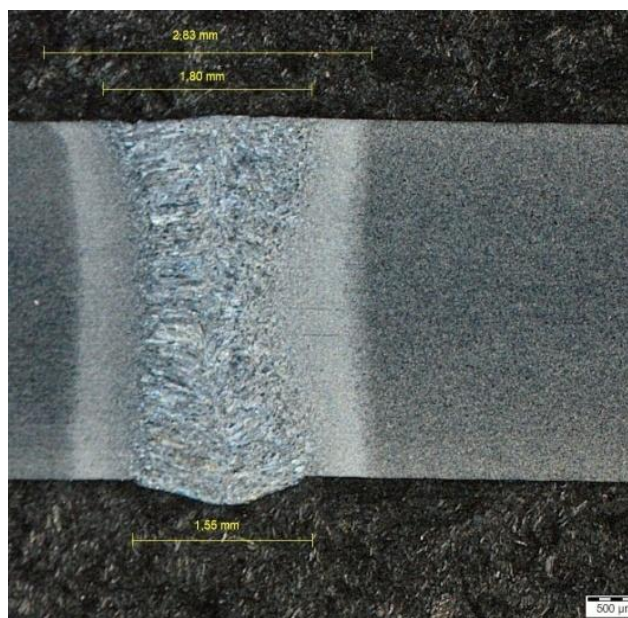


Obr. 39 Vzorek 3

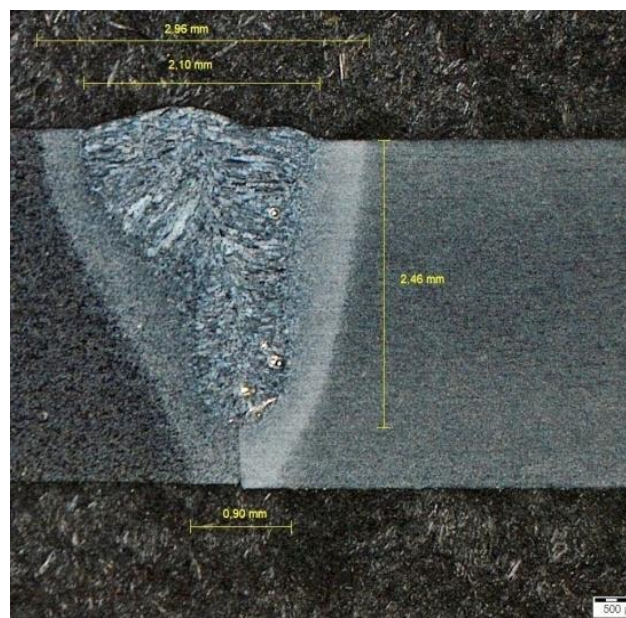


Obr. 40 Vzorek 7

Z obr. 39 a 40 je patrný neprovařený kořen, svar sahá téměř do stejné hodnoty, kterou je 2,60 mm. U metody LATIG je značně větší TOO a hlava svaru. Také je zde viditelná velká pórovitost. Pórovitost v takové míře by mohla mít vliv na mechanické vlastnosti svaru. Pro podrobné zjištění množství a rozložení pórů by musela být provedena prozařovací zkouška rentgenem.



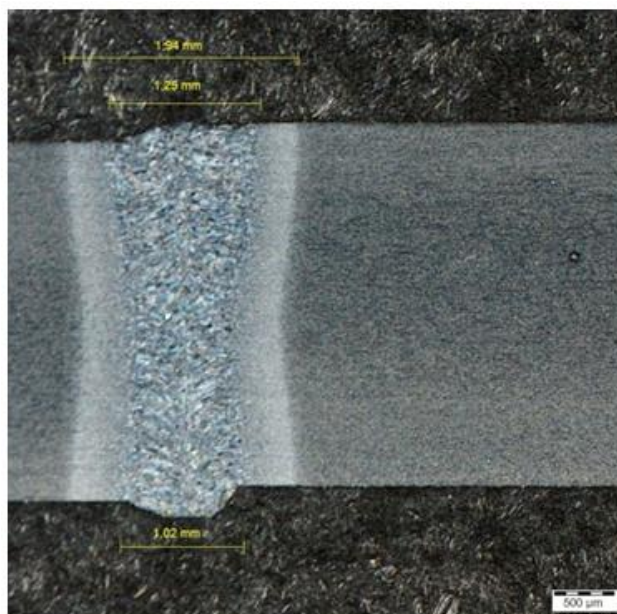
Obr. 41 Vzorek 6A



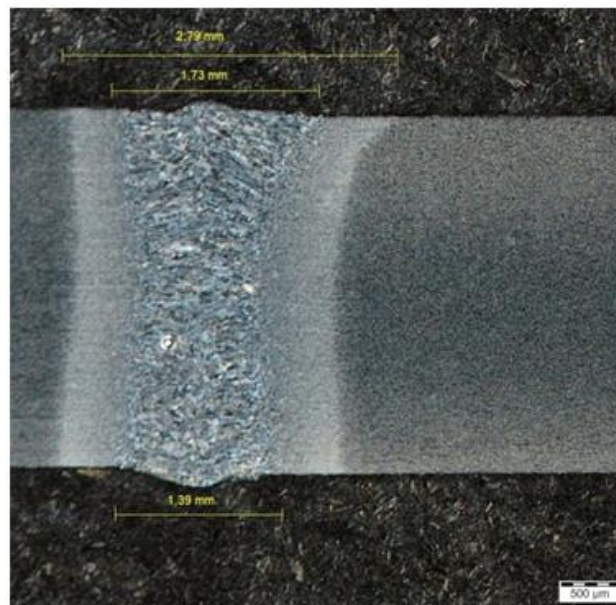
Obr. 42 Vzorek 7A

V případě vzorků svařených podruhé je patrný posun k lepšímu provedení svaru. Čistota elektrody je proto pro svařování podstatná. Jako zajímavý se jeví vzorek 7A obr 41, který je výrazně méně pórovitý než vzorek 7. Hloubka svaru ovšem dosahuje cca 2, 46 mm, to je asi

o 0,2 mm méně než u předešlého vzorku. Pravděpodobně je to z důvodu přeběhnutí oblouku během svařování v důsledku vysoké rychlosti svařování, čímž se zvětšila TOO asi o 0,3 mm.



Obr. 43 Vzorek 4

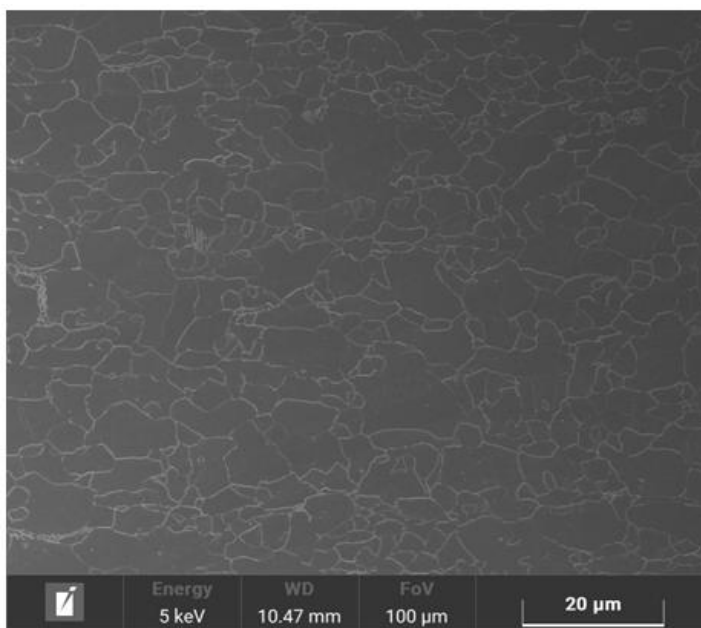


Obr. 44 Vzorek 8

Vzorky na obr. 43 a 44 jsou provařené v plné délce svaru bez ostrých přechodů, které by mohly působit jako koncentrátoři napětí. Obr. 44 obsahuje 1 nebo 2 malé póry.

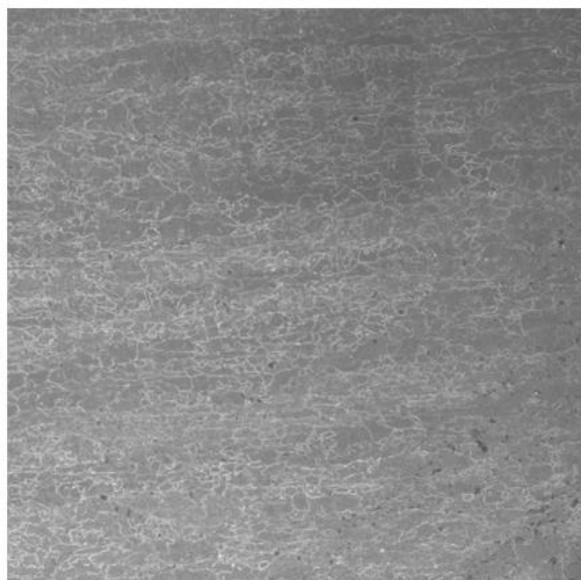
3.2 Mikrostruktura

Snímky pro rozbor mikrostruktury u heterogenních svarů byly pořízeny elektronovým mikroskopem S8000 ve společnosti Tescan. Pro vytvoření snímků byl zvolen detektor In Beam SE, a to pro větší rozlišovací schopnost povrchů a struktur. Snímky homogenních svarů byly pořízeny optickým mikroskopem Olympus LEXT 3100, z důvodu velké vytíženosti personálu a mikroskopů. Dále byly pořízeny fotky základních materiálů, TOO a svarového kovu. Materiál Domex 460 MC obr. 45 je základní materiál pro všechny svary vzorků. Jedná se o jemnozrnnou feritickou ocel s velmi malým podílem lamelárního perlitu. Ostatní materiály vzorků se liší. U vzorku 1 je jako další materiál použit Domex 700 MC obr. 46 s velice jemnou strukturou obsahující bainitický ferit. Jemnozrná struktura je dosažena termomechanickým zpracováním oceli. Svarový kov vzorku 1 obr. 47 obsahuje

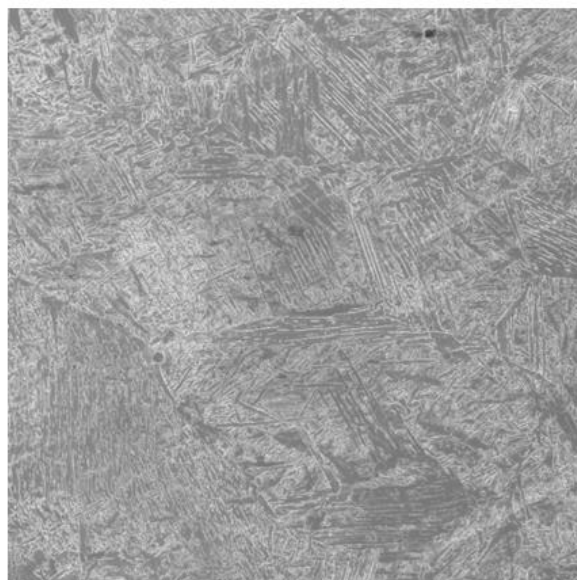


Obr. 45 Vzorek 1 Domex 460 MC základní materiál

směs bainitu, acikulárního feritu a martenzitu. TOO Domexu 700 MC příloha 3 se skládá z bainitu a acikulárního feritu, TOO Domexu 460 MC příloha 3 se liší na vzdálenosti od svaru od hrubozné zakalené struktury obsahující bainit a martenzit až po jemnozrnnou feriticko-cementitickou TOO s nepravidelnými vzdálenostmi od hranice závaru.

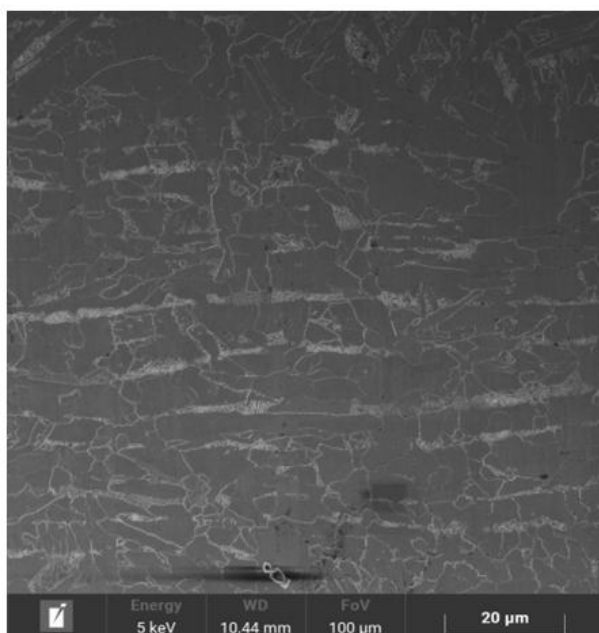


Obr. 46 Vzorek 1 Domex 700 MC základní materiál



Obr. 47 Vzorek 1 svar

Na obr. 48 se nachází materiál S355J2. Jedná se o feriticko-perlitickou ocel s náznakem řádkování. Svar na obr. 49 je tvořen bainitem a martenzitem. TOO materiálu S355J2 obsahuje ferit s oblastí částečné austenitizace.



Obr. 48 Vzorek 2 S355J2 základní materiál



Obr. 49 Vzorek 2 svar

Základní materiál vzorku 3 je hlubokotažná ocel DC01 obr. 50, která je tvořena feritem s ostrůvky cementitu. Svarový kov vzorku 3 obr. 51 je tvořen bainitickou a martenzitickou strukturou. TOO mezi DC01 a svarovým kovem obsahuje feriticko-cementitickou strukturu.

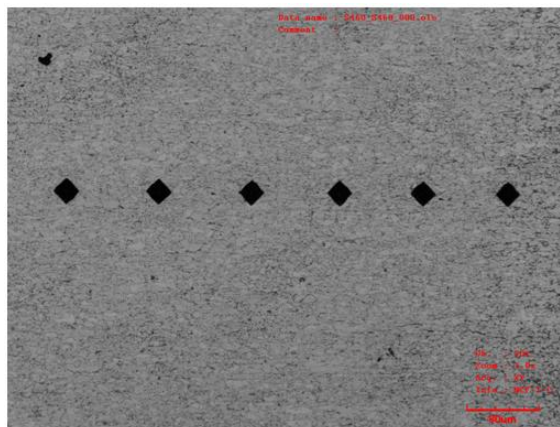


Obr. 50 Vzorek 3 DC01 základní materiál

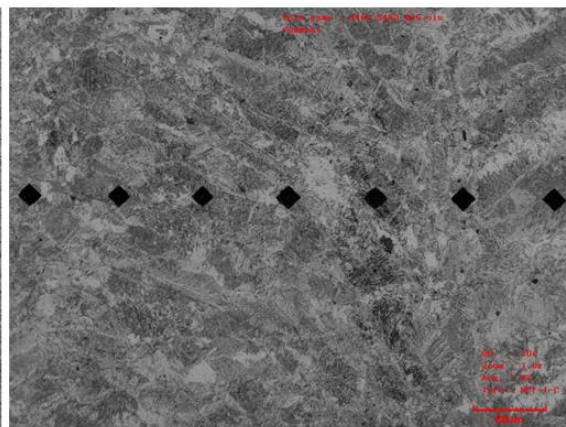


Obr. 51 Vzorek 3 svar

Svarový kov obr. 53 je tvořen bainitem a martenzitem. TOO je tvořena feritem s oblastí částečné austenitizace.

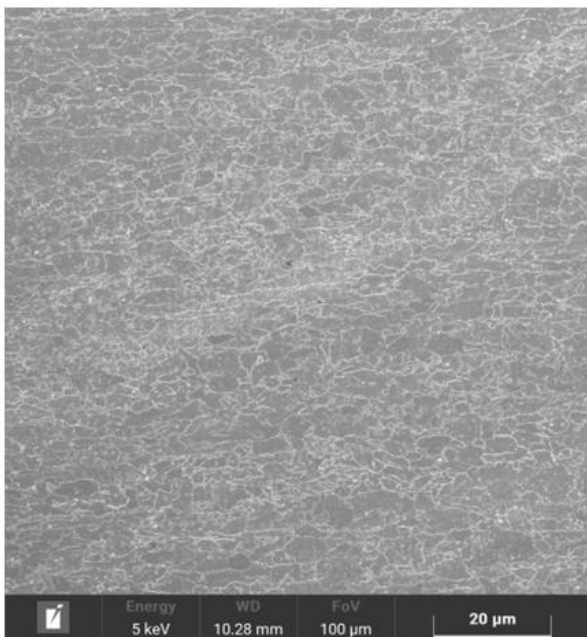


Obr. 52 Vzorek 4 Domex 460 základní materiál

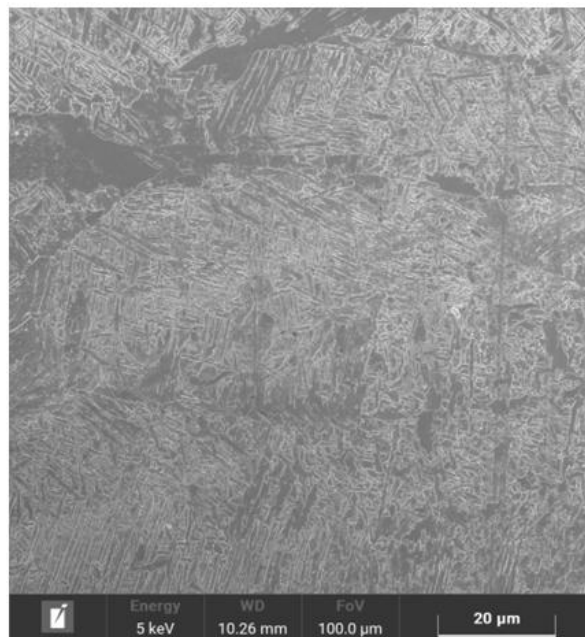


Obr. 53 Vzorek 4 svar

Od vzorku 5 byla použita jiná svařovací technologie LATIG. Základní materiál obr. 54 zůstává nadále stejný jako v případě vzorku 1 a nebude již znova popisován. Svarový kov vzorku 5 obr. 55 je tvořen směsí acikulárního feritu, bainitu a martenzitu, s větším podílem feritu po hranicích výchozího austenitu alotriomorfní ferit.

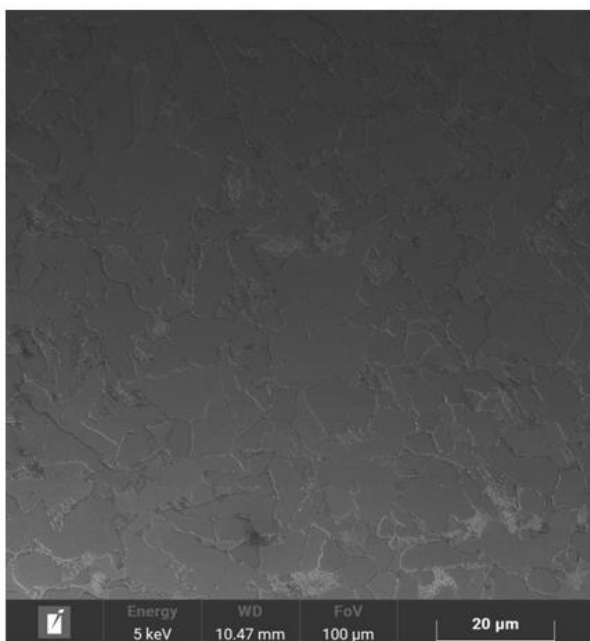


Obr. 54 Vzorek 5 Domex 700 MC
základní materiál

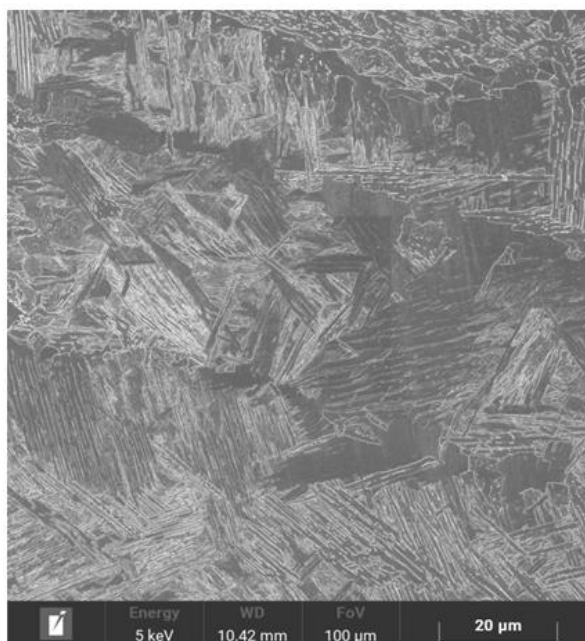


Obr. 55 Vzorek 5 svar

Na obr 56 je vzorek 6 materiál S355J2 bez náznaku řádkování, vzorek je nejspíše jinak orientovaný. Svarový kov obr. 57 je tvořen hrubším zrnem výchozího austenitu než u vzorku 2. Rozdíl je ve zvolené metodě, kdy je vneseno větší množství tepla. Pokud bude menší tvrdost, poklesl podíl martenzitu



Obr. 56 Vzorek 6 S355J2 základní
materiál



Obr. 57 Vzorek 6 svar

Na obr 58 je vzorek 7 materiál DC01. Svarový kov na obr. 59 je tvořen hrubším zrnem výchozího austenitu než u vzorku 2. Rozdíl je ve zvolené metodě, kdy je vneseno větší množství tepla. Pokud bude naměřena menší mikrotvrdost, znamená to, že poklesl podíl martenzitu TOO materiálu DC01 v příloze 3 je tvořena feriticko-cementickou strukturou.

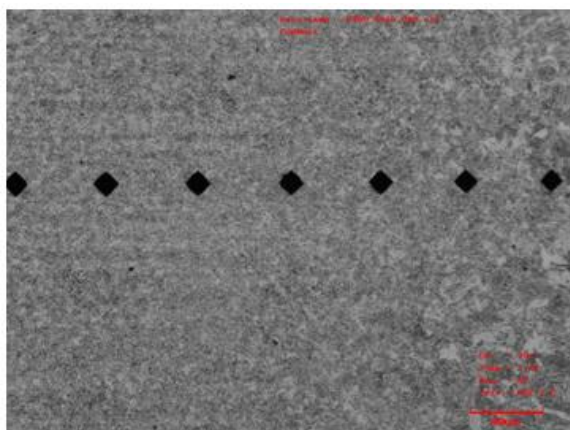


Obr. 58 Vzorek 7 DC01 základní materiál

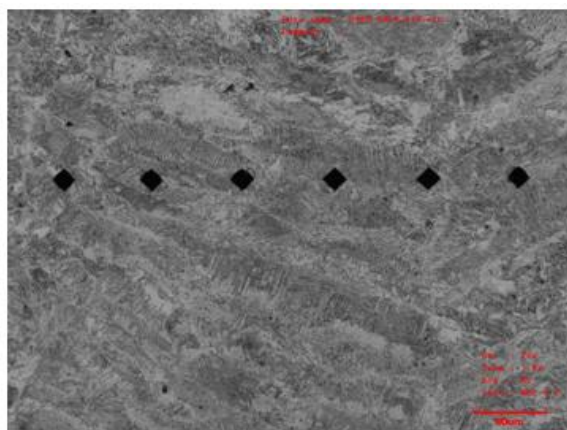


Obr. 59 Vzorek 7 svar

Svarový kov obr. 61 je tvořen hrubší strukturou výchozího austenitu s feritem. Vzhledem k výsledkům mikrotvrdosti svarový kov není tvořen homogenní strukturou. TOO obr. 60 se liší ve vzdálenosti od svaru od hrubozrnné zakalené struktury obsahující bainit a martenzit až po jemnozrnnou feriticko-cementitickou strukturu.



Obr. 60 Vzorek 8 TOO



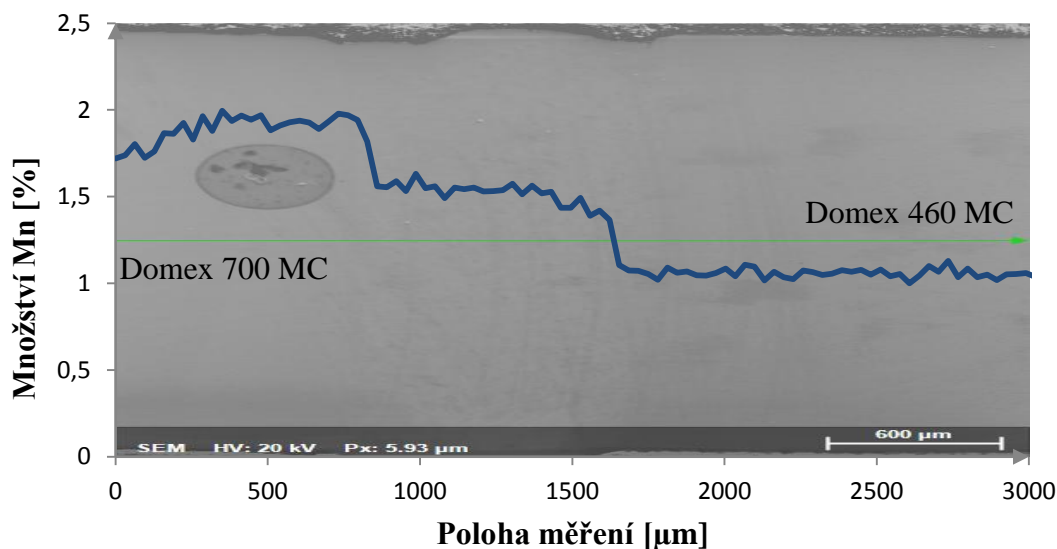
Obr. 61 Vzorek 8 svar

V závislosti na použité metodě svařování se mění velikost zrna a rozložení martenzitu ve svarovém kovu. Při použití laseru se ve svarovém kovu nachází menší zrna materiálu, ale zároveň obsahuje větší množství křehkých fází martenzitu.

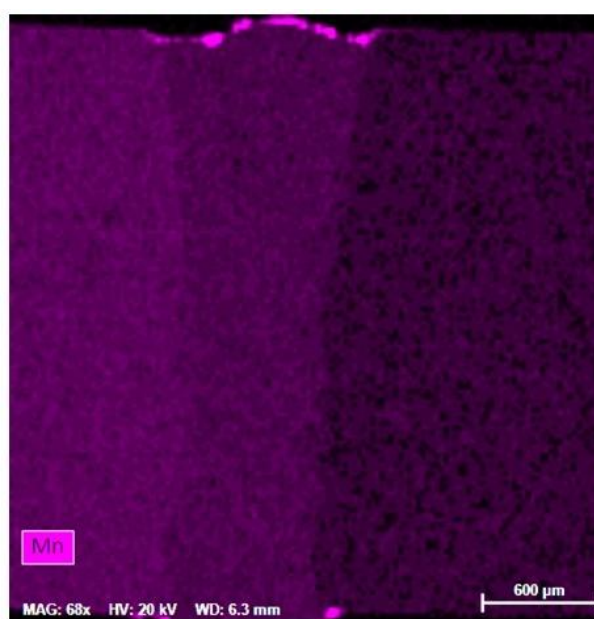
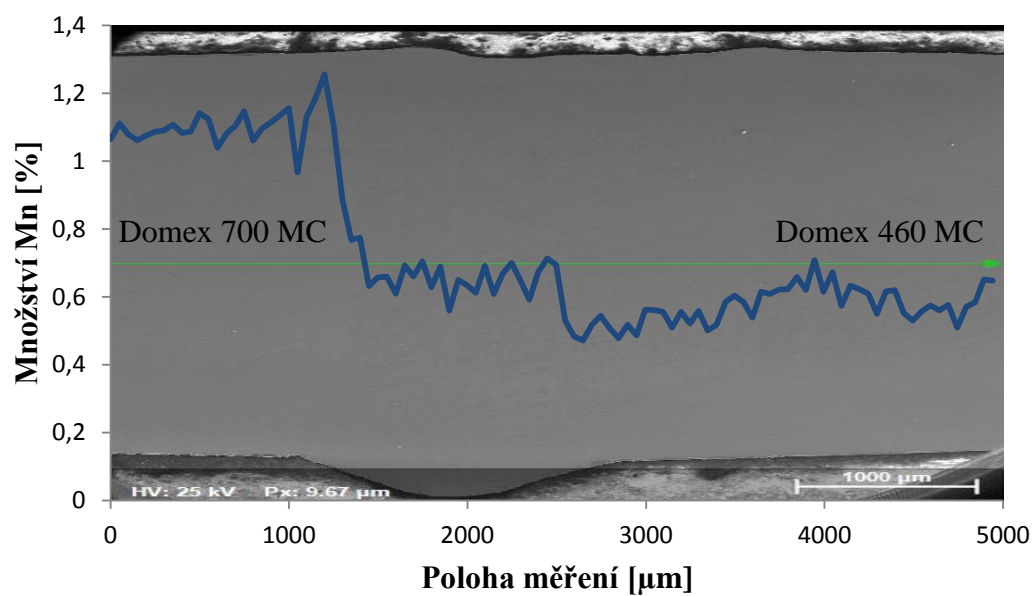
3.3 EDX analýza

Pro EDX analýzu a zobrazení prvkových map byly vybrány pouze heterogenní spoje, a to pro svoji materiálovou odlišnost. Vhodné prvky pro analýzu EDX jsou C, Fe a Mn. Ostatní prvky v ocelích jsou pod limitem detekce. Pro analýzu prvkových map byl vybrán Mn. Prvkové mapy byly vytvořeny na základě rozborů Mn v závislosti na poloze svařence obr. 62 až 67, kde světlejší barva znázorňuje vyšší koncentraci Mn. Obsah Mn se v závislosti na materiálu mění více než obsah C a Fe, a proto byl vybrán pro provedení EDX analýzy. Obsah Mn je měřen s rozestupem 30 μm . Na obr. 58 v horní části svaru je patrná vyšší koncentrace Mn. Jedná se s největší pravděpodobností o chybu či nečistoty. U vzorků 1, 2, 5 a částečně i 6 je vidět jasný mezischod koncentrace manganu mezi oběma základními materiály. Z toho můžeme vyvozovat, že svaření laserem či LATIGem dovoluje tavné lázni svarového kovu jeho plné promísení. U vzorku 3 a 7 je patrné, že základní materiál DC01 patrně obsahuje menší množství Mn, než které má předepsáno. Zde možná nastal tak velký rozdíl Mn, který nemohl být při vysoké rychlosti svařování dostatečně promísen napříč svarovým kovem. Mezi oběma základními materiály je pouze zanedbatelný schod. Množství Mn v oceli má vliv na tepelnou vodivost. Čím je koncentrace Mn vyšší, tím je nižší tepelná vodivost a tím je menší TOO.

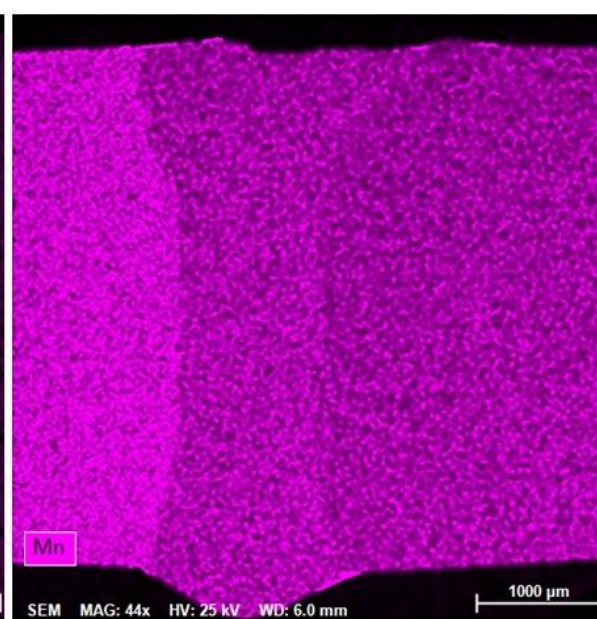
Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 1



Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 5

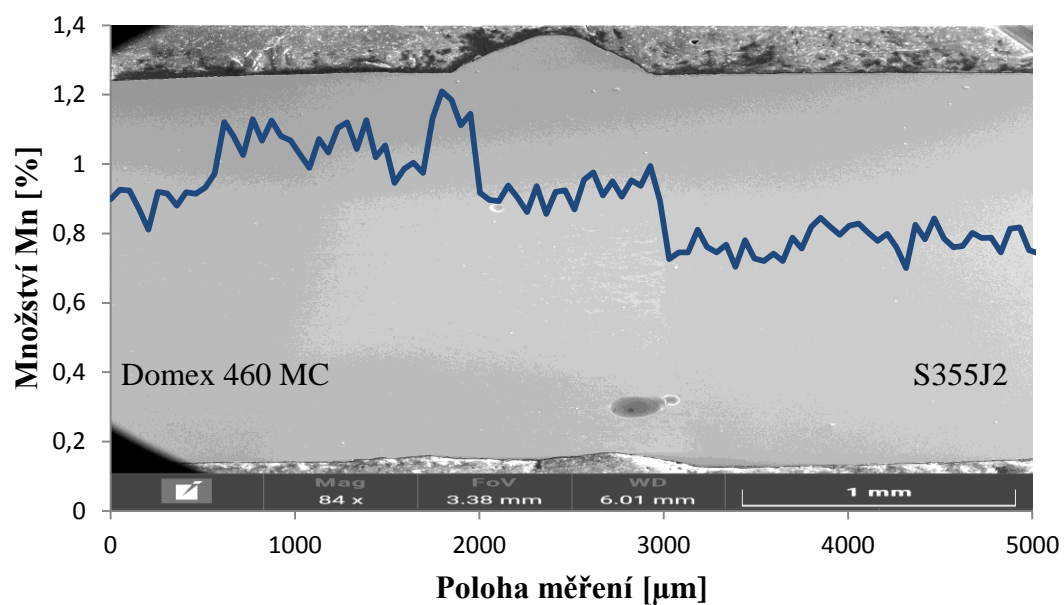


Obr. 62 Vzorek 1 prvková mapa Mn

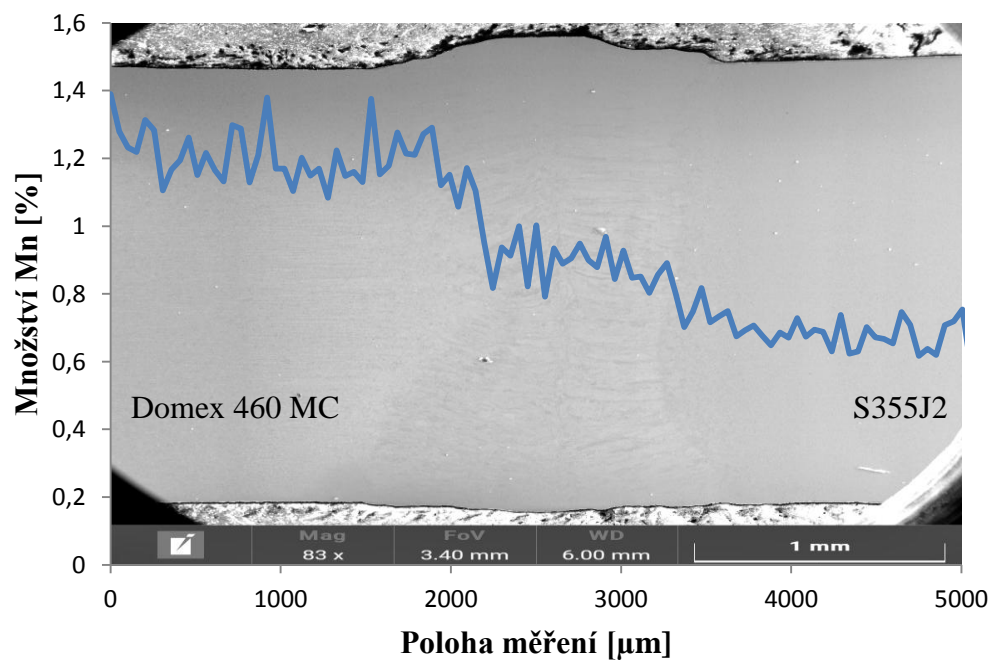


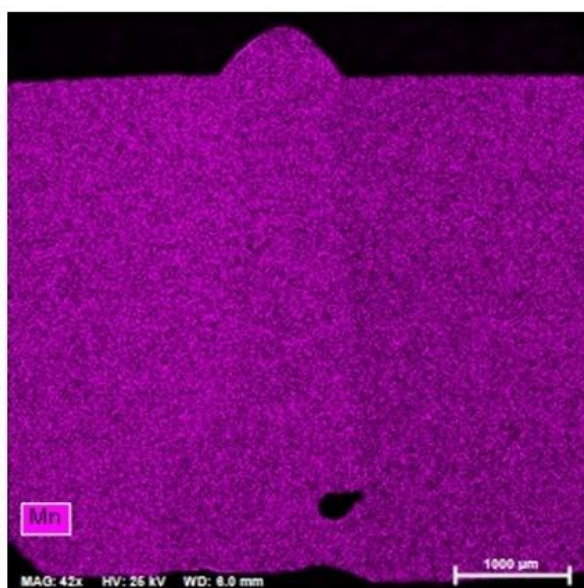
Obr. 63 Vzorek 5 prvková mapa Mn

Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 2

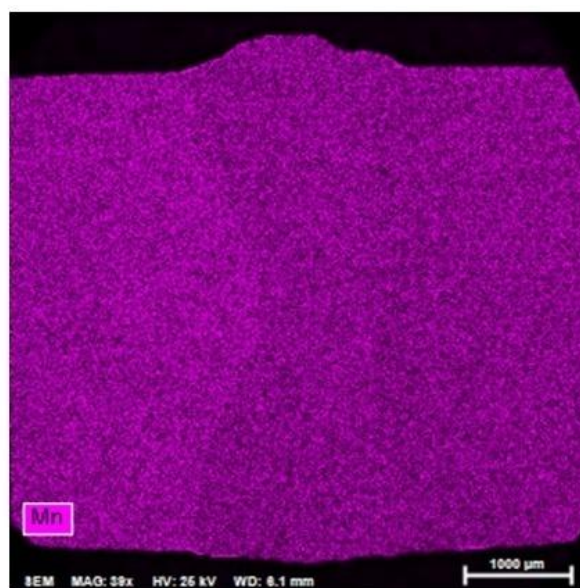


Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 6



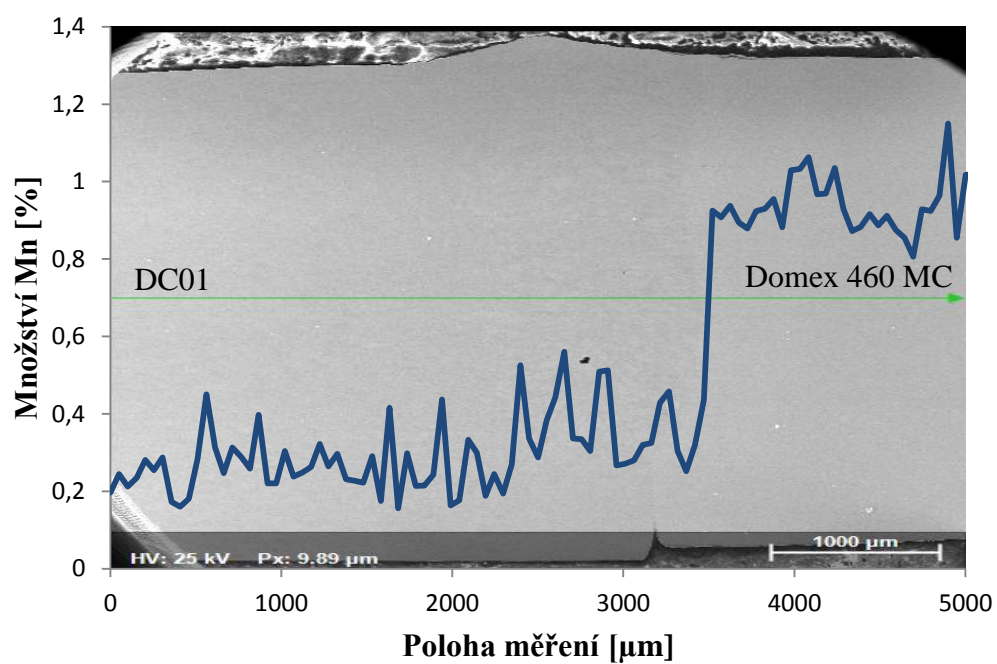


Obr. 64 Vzorek 2 prvková mapa Mn

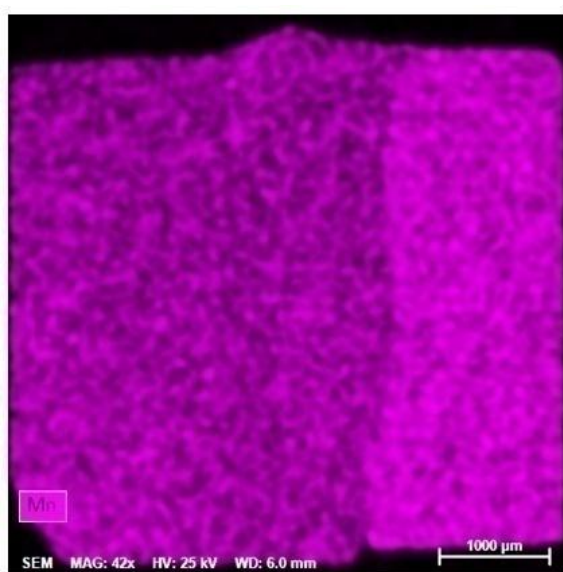
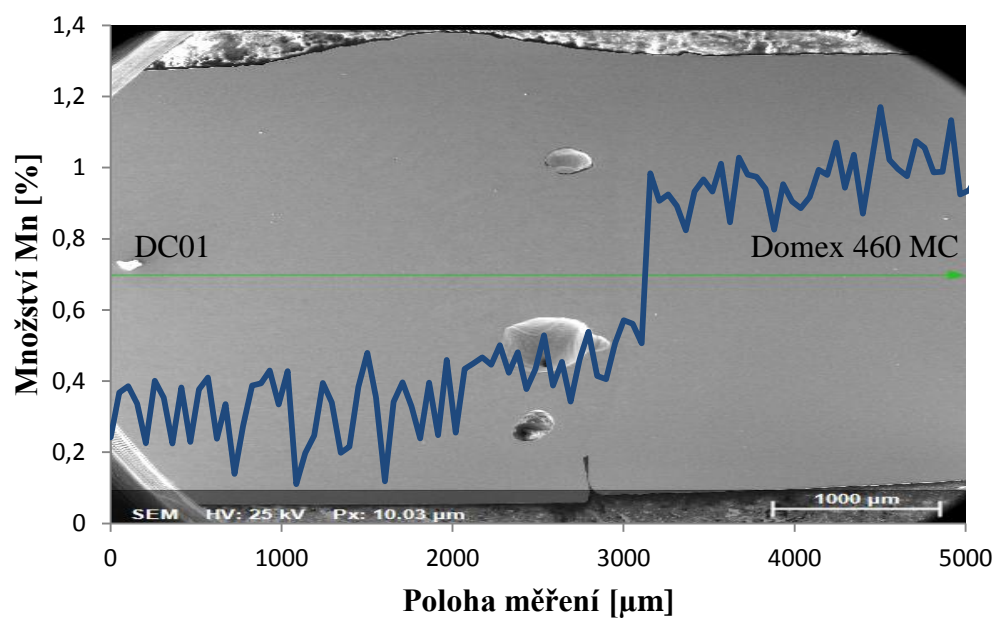


Obr. 65 Vzorek 6 prvková mapa Mn

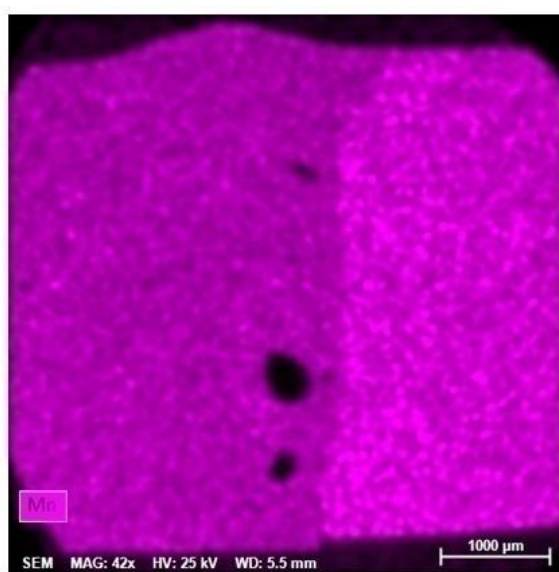
Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 3



Graf obsahu Mn na poloze svaru vzorku 7

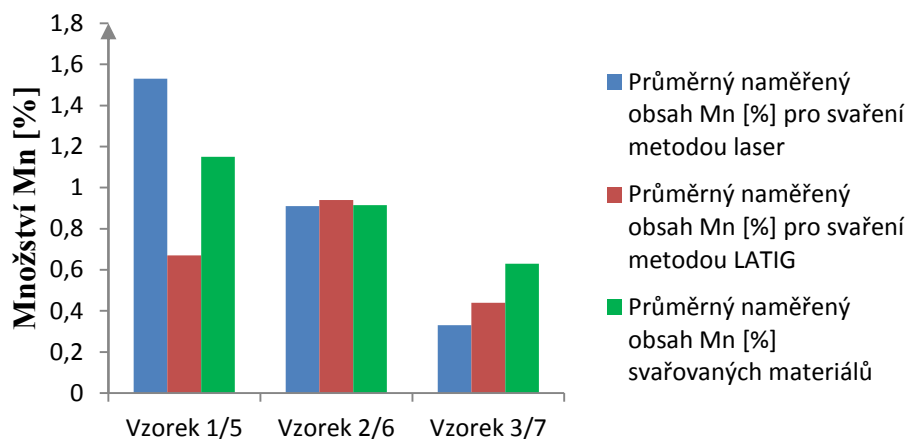


Obr. 66 Vzorek 3 prvková mapa Mn



Obr. 67 Vzorek 7 prvková mapa Mn

Vliv svařovací metody na množství Mn ve svarovém kovu

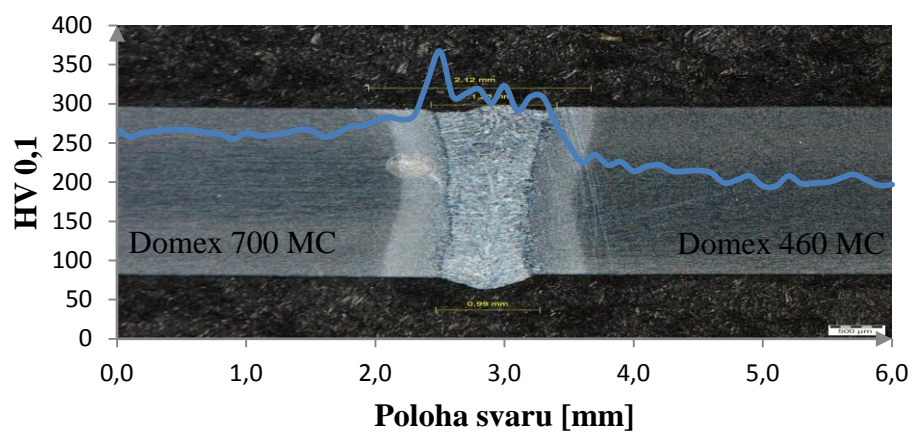


V grafu je popsána koncentrace Mn v závislosti na svařovacím procesu. Zelený sloupec znázorňuje teoretický střed mezi množstvím Mn v obou materiálech. Této hodnotě by měly odpovídat všechny vzorky. Z naměřených výsledků je patrné, že materiály nedosahují množství Mn podle materiálových listů z přílohy 1. U vzorků 2 a 6 se množství Mn pohybuje okolo průměrné hodnoty Mn svařovaných materiálů. To je dáno velmi podobnou koncentrací Mn v těchto materiálech. Největší rozdíl je vidět na vzorku 1 a 5. Svarový kov dosahuje při svařování keyhole velmi složitého proudění, a tím může být koncentrace Mn rozdílná v jednotlivých rovinách svaru. Pro validnější výzkum by bylo nutné měřit koncentrace Mn napříč svarem na statistickém vzorku.

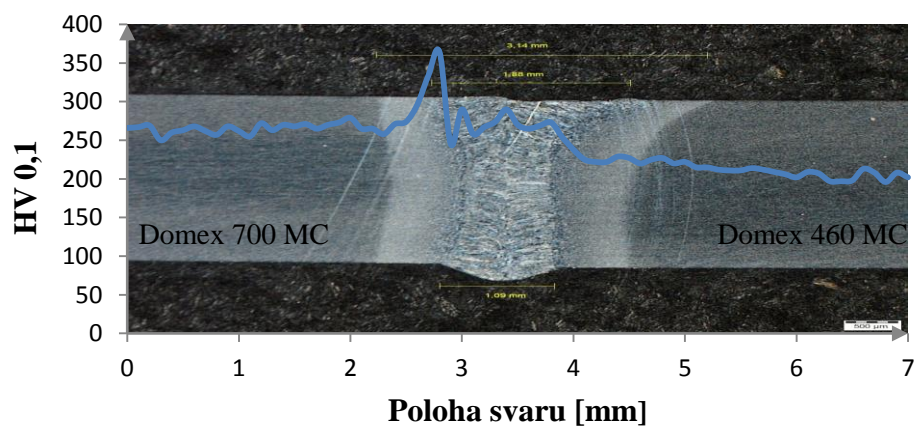
3.4 Mikrotvrdost

Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse byla provedena na všech svařovaných vzorcích napříč celým svarem zatížením 0,98 N po dobu 10 s podle normy ČSN EN ISO 6507 – 1 na Ústavu materiálů věd a inženýrství. Za pomoci hodnoty tvrdosti je možné orientačně předpokládat další mechanické vlastnosti svařeného materiálu. Jde především o houževnatost, mez kluzu a mez pevnosti. Čím vyšší hodnota mikrotvrdosti bude naměřena, tím vyšší hodnoty meze kluzu a pevnosti lze očekávat. Limitující v těchto případech svarů je ovšem materiál s menší mezí kluzu a pevnosti. Opačný případ nastává u houževnatosti. Čím vyšší hodnota tvrdosti, tím menší hodnotu nárazové práce lze očekávat. Grafy mikrotvrdosti jsou k dispozici níže.

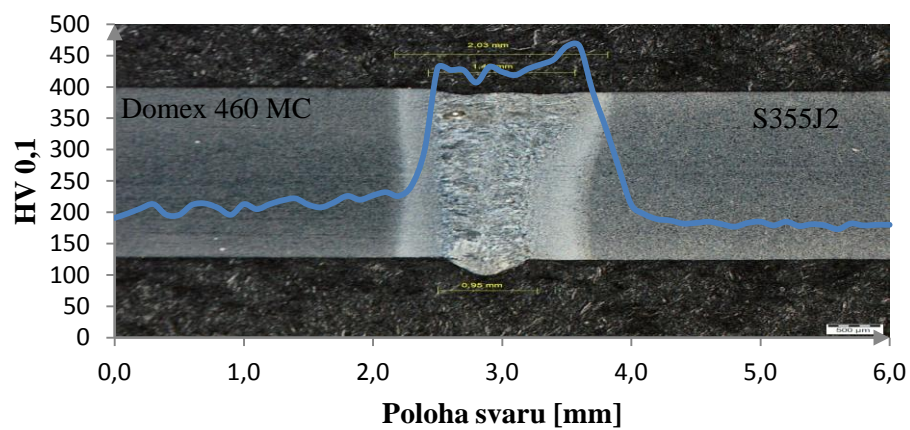
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 1**



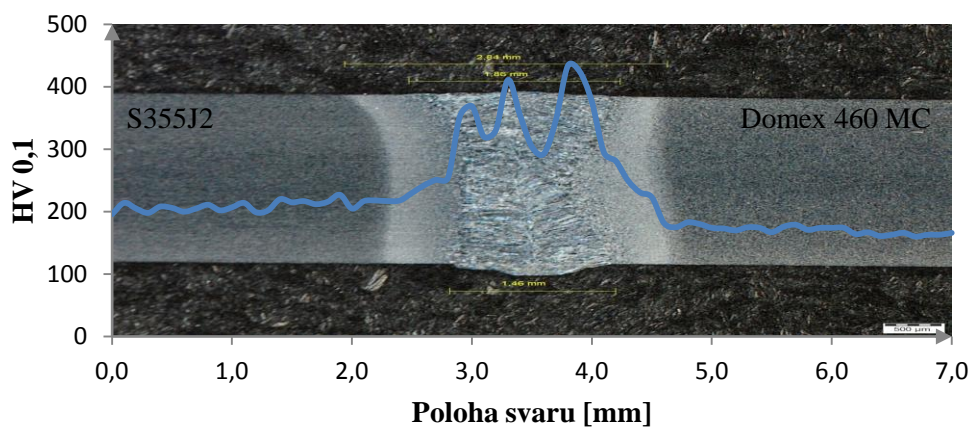
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 5**



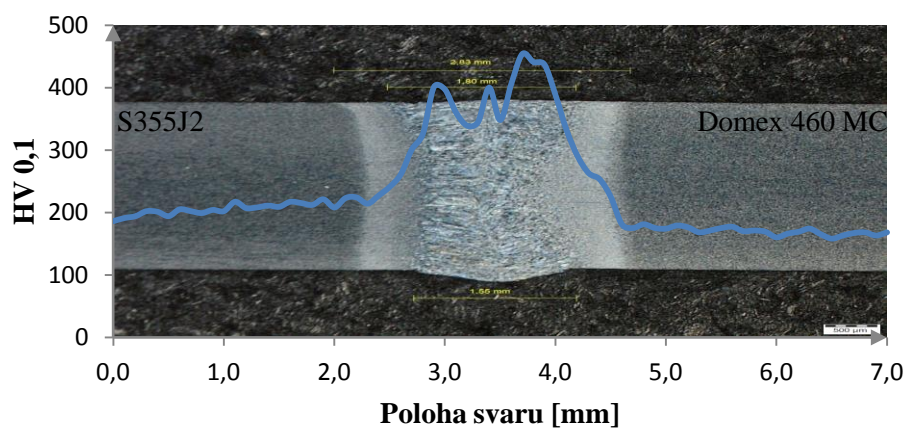
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 2**



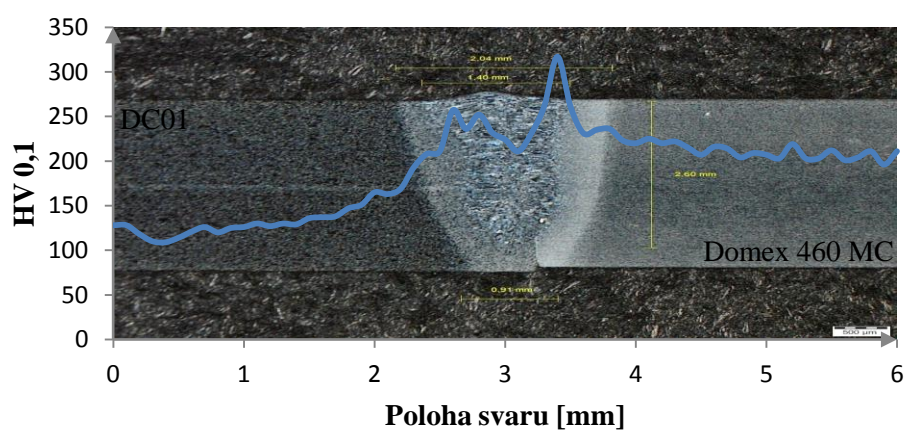
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 6**



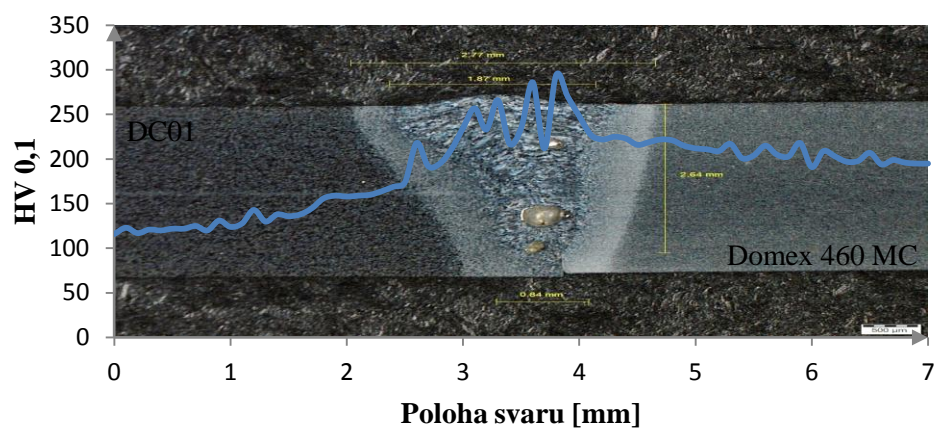
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 6A**



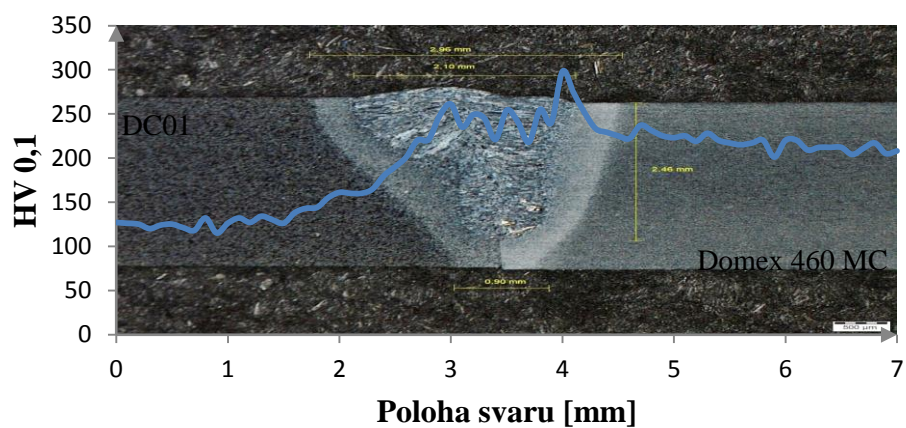
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 3**



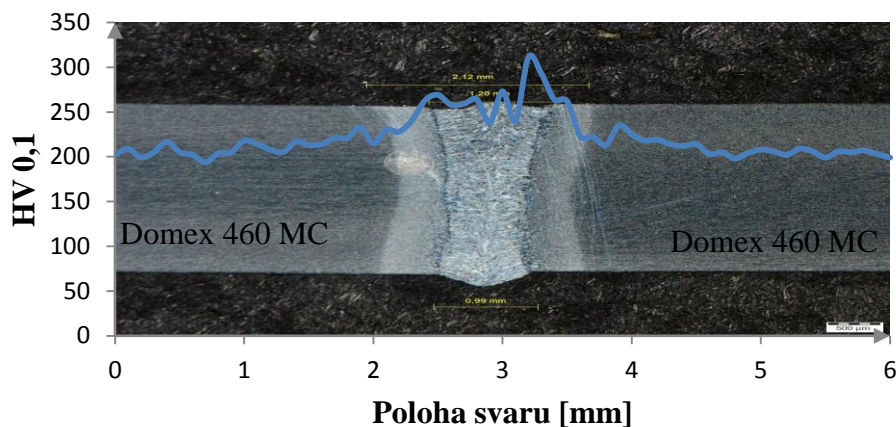
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 7**



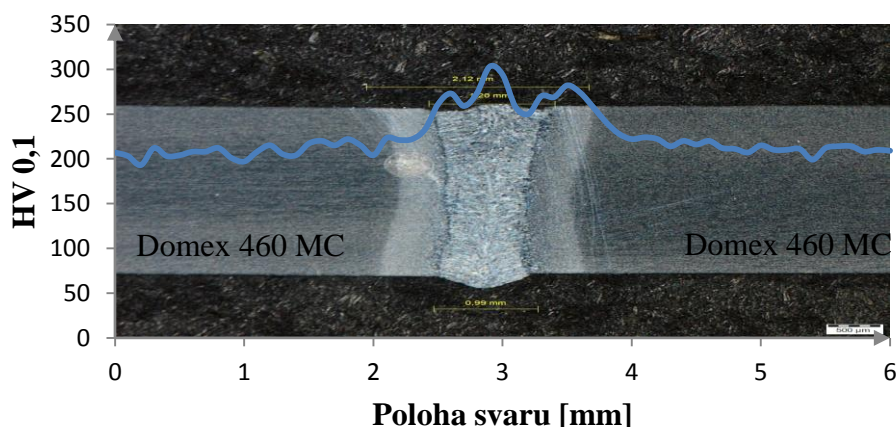
**Graf průběhu mikrotvrdosti na poloze svaru
vzorku 7A**



**Graf průběhu mikrotvrlosti na poloze svaru
vzorku 4**

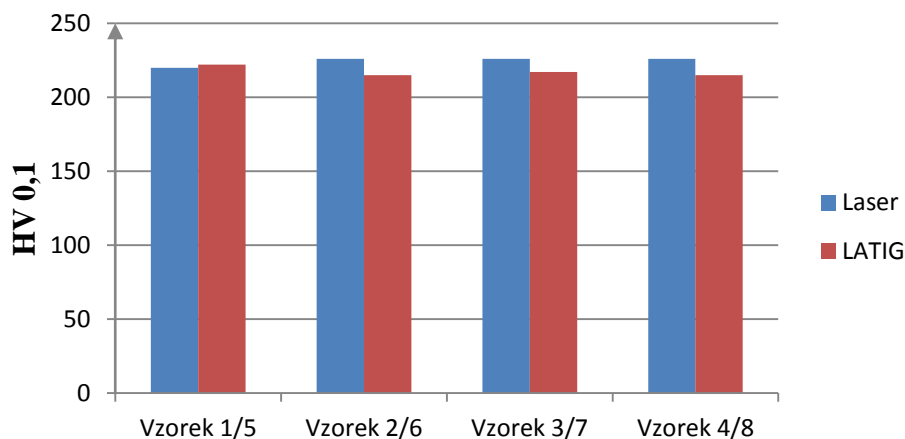


**Graf průběhu mikrotvrlosti na poloze svaru
vzorku 8**

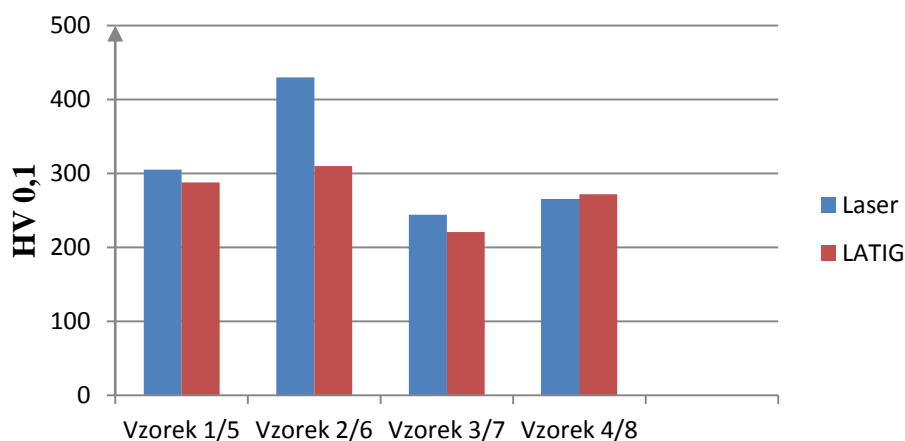


Nejvyšší hodnota mikrotvrlosti byla naměřena na vzorku 2. Průměrná hodnota mikrotvrlosti materiálu Domex 460 MC je 205 HV 0,1, Domex 700 MC je 263 HV 0,1, S355J2 je 172 HV 0,1 DC01 je 125 HV 0,1. Na mikrotvrlosti je vidět vliv jemnozrné struktury. Čím jemnější struktura, tím vyšší je tvrdost, a tím vyšší lze očekávat pevnost. Ve svarovém kovu vzorku 2, 6 a 6A byla v případě aplikace metody laser naměřena hodnota mikrotvrlosti 430 HV 0,1, přičemž za použití metody LATIG hodnota mikrotvrlosti klesla na 360 HV 0,1. Z toho lze vyvozovat snížení podílu martenzitu ve svarovém kovu. Sníženou vrubovou houževnatost a zvýšení podílu martenzitu lze očekávat u materiálu S355J2, kde byla naměřena nejvyšší hodnota mikrotvrlosti ze všech měřených vzorků od 434 až po 465 HV 0,1. U vzorku 8 byla naměřena nejvyšší mikrotvrlost 303 HV 0,1 uprostřed svaru. Ve všech ostatních případech byla nejvyšší hodnota naměřena na hranici svarového kovu a TOO. Nejvyšší hodnota mikrotvrlosti ve středu svarového kovu je pravděpodobně zapříčiněna nehomogenitou svarového kovu.

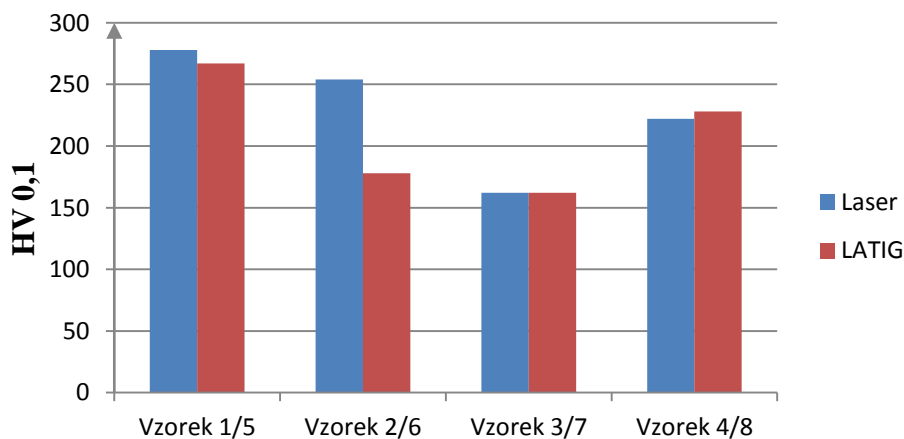
Vliv metody svařování na mikrotvrdost v TOO Domexu 460 MC



Vliv metody svařování na mikrotvrdost svaroveho kovu



Vliv metod svařování na mikrotvrdost v TOO svařených materiálu



Pro věrohodnější výsledky by bylo nutné provést měření více vzorků, tj. od tří do pěti vzorků od každého svaru a měření vzájemně porovnat. Mikrotvrdost TOO u materiálu Domex460 MC je velmi podobná. Výsledný přehřev nemá výrazný vliv na mikrotvrdost materiálu Domex 460 MC. Mikrotvrdost ve svarovém kovu se zásadně liší v případě materiálu S355J2, u kterého vyšla nejvyšší teplota přehřevu 127 °C. Pro tento materiál má přídavné teplo výrazný vliv na pokles martenzitu, a tím i na pokles mikrotvrdosti ve svarovém kovu i TOO. U ostatních materiálů je vliv použité metody zanedbatelný.

4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole budou rozebrány technicko-ekonomické aspekty svařovaných vzorků. Ekonomická stránka bude pouze nastíněna, protože se v rámci této práce jedná pouze o vzorky pro výzkum a ne o skutečné součásti. Navíc jsou získané hodnoty vztaženy pro akademické prostředí ÚPT v Brně. Získané hodnoty by se v porovnání s průmyslovou výrobou značně lišily, zejm. v důsledku vstupu dalších nákladů do výroby, jako např. náklady na ověřovací sérii, výrobu prototypu, servis anebo na výrobu svařovacích přípravků. Technicko-ekonomické zhodnocení bude provedeno pro dvě svařovací varianty. Jedná se o variantu laserového pracoviště a pracoviště s hybridním svařováním LATIG. Vstupní hodnoty pro výpočet hodinové sazby jednotlivých pracovišť jsou v tab. 15.

Tab. 15 Vstupní parametry pro technicko–ekonomické zhodnocení.

Vstupní parametry		
Položky výpočtů	Cena	Symbol
Pořizovací cena Laser IPG YLS 2000 [Kč]	8 000 000	-
Pořizovací cena robota ABB IRB 2400/16 [Kč]	2 000 000	-
Pořizovací cena TIG Fronius MagicWave 1700 [Kč]	80 000	-
Odpisy pro Laser IPG YLS 2000 [Kč]	400	O _L
Odpisy pro robota ABB IRB 2400/16 [Kč]	100	O _R
Odpisy pro TIG Fronius MagicWave 1700 [Kč]	4	O _T
Ochranný plyn varianta Laser [Kč/hod]	3	P _L
Ochranný plyn varianta LATIG [Kč/hod]	5,50	P _{LT}
Mzda operátora [Kč/hod]	238	M
Elektrická energie Laser [Kč/hod]	20	E _L
Elektrická energie LATIG [Kč/hod]	24	E _T
Údržba pracoviště laseru [Kč/hod]	12,50	Ú _L
Údržba pracoviště LATIG [Kč/hod]	14	Ú _{LT}
Režie 200 [%]	2	R
Zisk 20 [%]	1,20	Z

Výpočet hodinové sazby laseru:

$$Laser = [(O_L + O_R + P_L + M + E_L + Ú_L) \cdot R] \cdot Z = [Kč/hod]$$

$$Laser = [(400 + 100 + 3 + 238 + 20 + 12,50) \cdot 2] \cdot 1,2 = 1856,40 \text{ Kč/hod}$$

Výpočet hodinové sazby LATIGu je analogický:

$$LATIG = [(400 + 100 + 4 + 5,50 + 238 + 24 + 14) \cdot 2] \cdot 1,2 = 1885,20 \text{ Kč/hod}$$

Výsledné korunové vyjádření hodinové sazby se dle metodiky nastavené pro účely této práce zaokrouhluje na celé stokoruny nahoru. Hodinové sazby tedy budou zaokrouhleny na následující částky, v případě laserového pracoviště z 1856,40 Kč/hod na 1860 Kč/hod a v případě pracoviště LATIG z 1885,20 Kč/hod na 1890 Kč/hod. Metoda LATIG je tedy v důsledku o 1,61 % nákladnější než metoda svařování laserem.

5 ZÁVĚRY

Práce řeší svařitelnost materiálu Domex 460 MC v závislosti na svařovací metodě a heterogenním základním materiálu. Svařované materiály jsou používány v automobilovém průmyslu pod názvem Tailor Blanks, např. jako prahy do automobilu Škoda Octavia III.

V rámci experimentu byly vypočítány hodnoty vneseného tepla, uhlíkových ekvivalentů a teploty přehřevu podle Sefariána. Vypočítaná hodnota teploty přehřevu pro svařovaný materiál Domex 460 MC vyšla 42 °C a byla použita jako orientační údaj z důvodů, které jsou popsány v kap. 3.1. Bylo svařeno celkem 10 vzorků na ÚPT v Brně, a to za použití metody laser a LATIG. Svařované materiály byly Domex 460 MC, Domex 700 MC, S355J2 a DC01, ze kterých byly následně zhotoveny metalografické výbrusy. Na základě těchto výbrusů byly provedeny rozborů makrostruktury, mikrostruktury, mikrotvrdosti a prvkové mapy pomocí EDX analýzy. Před samotným svařením v průběhu svařování metodou laser je nutné dbát na správné upnutí mezery svařovaného materiálu. V experimentu byly vzorky svařeny s mezerou 0 mm, ale v případě výroby TB jako možné praktické aplikace by bylo velmi obtížné dosáhnout takovéto mezery na všech kusech. Pro dobré svaření materiálu je nutné dbát na dobrý stav wolframové elektrody.

Z rozboru makrostruktury jsou patrné větší pórovitost a TOO při použití metody LATIG oproti laseru. Přídavný zdroj tepla v podobě TIGu nemá výrazný vliv na hloubku penetrace svaru, zato má výrazný vliv na velikost TOO. V případě vzorků 3, 7 a 7A nenastalo ani v jednom případě úplné provaření svaru. Vzorek 1 má v horní části svaru ostré přechody mezi svarovým kovem a základním materiálem a v dolní části propadlý kořen. Takový přechod může fungovat jako koncentrátor napětí a snižovat únosnost při cyklickém namáhání. Vrubový účinek je možné snížit zabroušením.

Z analýzy mikrostruktury a mikrotvrdosti je patrné, že metoda LATIG má vliv na snížení podílu martenzitu v oblasti TOO a svarového kovu, avšak snížení mikrotvrdosti je pouze v řádu jednotek až desítek HV 0,1. Nejvyšší naměřená hodnota byla 465 HV 0,1 u vzorku 2 na straně materiálu S355J2. Pro materiál S355J2 je patrný výrazný vliv svařovací metody LATIG na výsledné snížení mikrotvrdosti. Pro materiály Domex 460 MC, Domex 700 MC a DC01 není patrný výrazný vliv svařovací metody na výslednou mikrotvrdost.

Metoda LATIG oproti laseru nabízí z technicko-ekonomického hlediska nižší pořizovací cenu, zvýšení výkonu, zlepšení svařovacího procesu a vzájemné fyzikální spolupráce obou metod, avšak její nevýhodou je zvýšení hodinové sazby modelového případu pracoviště o 1,61 %. Pro konkrétní druh výrobku bude na zvážení, zda bude lepší zvolit levnější variantu se zanedbatelně dražším provozem LATIG, nebo dražší laserovou variantu s levnějším provozem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [2]

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. : il. ISBN 80-85771-81-0
2. CITACE PRO: Webová stránka. *Citace* [online]. [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://citace.lib.vutbr.cz/dokument/hNChTA0Az4B0gCWj>
3. BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-85771-97-7
4. KATAYAMA, Seiji, ed. Handbook of laser welding technologies. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9.
5. LAWRENCE, Jonathan, ed. Advances in laser materials processing: technology, research and applications. Oxford: Woodhead Publishing, 2010. Woodhead Publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-474-6
6. KIM, Cheolhee;choi. Relationship between the Weldability and the Process Parameters for Laser-TIG Hybrid Welding of Galvanized Steel Sheets. Materials Transactions [online]. Sendai: Japan Science and Technology Agency, 2008, 49(1), 179 [cit. 2019-01-09]. DOI: 10.2320/matertrans.MER2007159. ISSN 13459678. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1467678531/>
7. WEMAN, Klas. Welding processes handbook. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-0-85709-510-7.
8. MAŇKOVÁ, Ildikó. Progresívne technológie: Advanced methods of material removal. Košice: Vienaľa, 2000. ISBN 80-7099-430-4.
9. ŽIVKO, Babić a Milan ŠLJIVIĆ. Application of tailored blanks in the automotive industry. 1. Banja Luka: Journal for Technology of Plasticity, 2002/12/01, 27
10. MERKLEIN, Marion, Maren JOHANNES, Michael LECHNER a Andreas KUPPERT. A review on tailored blanks—Production, applications and evaluation. Journal of Materials Processing Technology. 2014, 214(2), 151-164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.015>. ISSN 0924-0136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013613002653>
11. Technologie tailored blanks: Základní princip technologie [online]. MM průmyslové spektrum, 2002, 1(7) [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks.html>
12. SINGH, Bharat Raj. A Hand Book on Friction Stir Welding. UK: Lambert Academic Publishing, 2012/06/05. DOI: 10.13140/RG.2.1.5088.6244. ISBN 978-3-659-10762-7.

13. Svařovací technika: Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování. [https://www.schinkmann.cz: Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování \[online\]. Mladá Boleslav, \[b.r.\] \[cit. 2019-03-10\]. Dostupné z: https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani](https://www.schinkmann.cz: Odporové svařování, bodové svařování, švové svařování [online]. Mladá Boleslav, [b.r.] [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani)
14. KANNATEY-ASIBU, E. Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.
15. NYPRO. NYPRO: Ocelové plechy válcované za studena [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://nyprohutni.cz/valcovane-za-studena>
16. Kondor: Kruhová ocel. In: Kondor: Kruhová ocel [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.kondor.cz/ocel-kruhova-za-tepla-s355j2/c-1544/>
17. Aret steel: Válcovaná kruhová tyčová ocel S355J2 / 11523. Aret steel: Válcovaná kruhová tyčová ocel S355J2 / 11523 [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://www.aretsteel.com/cz/27-valcovana-kruhova-tycova-ocel-s355j2-11523>
18. New.abb.com: IRB 2400. In: New.abb.com: IRB 2400 [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-2400>
19. New.abb.com: IRB 2400. New.abb.com: IRB 2400 [online]. 2019 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10034EN_R7&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
20. MRŇA, Libor. Vysokofrekvenční svařování. [Http://ust.fme.vutbr.cz](http://ust.fme.vutbr.cz) [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_vysokofrekvenčni_svarovani_mrna.pdf
21. High Frequency Induction Welding. <https://player.slideplayer.com> [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://player.slideplayer.com/9/2519855/#>
22. SAMARDZIC, Veljko. Resistance and Solid-State Weliding Proces. In: <https://www.slideserve.com> [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/neil-stephenson/resistance-and-solid-state-welding-processes>
23. Rozdělení elektromagnetického záření. In: [Wirelessly.webnode.cz](http://wirelessly.webnode.cz): Rozdělení elektromagnetického záření [online]. 2014 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: <https://wirelessly.webnode.cz>
24. Lascam.cz: Technologie a trendy. In: Lascam.cz: Rozdelenie laserov [online]. 2015, 3.8.2015 [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/sk/rozdelenie-laserov/>
25. Přehled technologií svařování v ochranných plynech [online]. Praha: MM publishing, 2010, (3) [cit. 2019-04-04]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prehled-technologie-svarovani-v-ochrannych-plynech.html>

26. Linde-gas.cz. Ochranné plyny [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/shielding_gases/index.html
27. MRŇA, Libor. Speciální metody svařování: Vysokofrekvenční svařování. Speciální metody svařování: Vysokofrekvenční svařování [online]. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_vysokofrekvencni_svarovani_mrna.pdf
28. PILOUS, Václav. Technologie kovových materiálů. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 9788070436998.
29. KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. Svařování I. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 8024808706.
30. NEUMANN, Heinz. Teorie svařování a pájení. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 9788074941719.
31. Svařitelnost. Valentazt: Dokumenty [online]. Všetaty, 2016, 3. 3. 2016 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.valentazt.cz/files/dokumenty/cz.svaritelnost.pdf>
32. KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 9788024820255.
33. Přehled způsobů svařování a základní dělení metod dle EN ISO 4063. Svarox: Přehled způsobů svařování a základní dělení metod dle EN ISO 4063 [online]. 2016, 4.3.2016 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <http://svarox.cz/prehled-zpusobu-svarovani-a-zakladni-deleni-metod-dle-en-iso-4063/>
34. Cintas: additive & laser welding. Cintas: additive & laser welding [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.cintasmachining.com/capabilities/special-processes/additive-laser-welding/>
35. Možné dělení typů a druhů laseru. Leonardo technology: Kapalinové (barvivové) lasery [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>
36. Svarinfo: TIG svařování I - základní principy. Svarbazer [online]. 2009, 7.1. 2009 [cit. 2019-04-19]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008011702>
37. Meccanica Gervasoni. In: Offshore-technology: Meccanica Gervasoni [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: <https://www.offshore-technology.com/contractors/machining/meccanica-gervasoni/attachment/meccanica-gervasoni4/>
38. Ohřev. Linde-gas [online]. [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: https://www.linde-gas.cz/cs/industries/copy_of_metal_fabrication/heating.html
39. Indukční ohřev a nové hybridní technologie: Indukční předehřev při svařování laserem [online]. Praha: MM publishing, 2004, (041090) [cit. 2019-04-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/indukcni-ohrev-a-nove-hybridni-technologie.html>

40. BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. Cws-anb [online]. Plzeň: CWS ANB, 2012, 1.3.2012 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
41. Hodnocení kvality svarového spoje: 2. Kontrola svarů. In: Ústav strojírenské technologie [online]. Praha [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://u12133.fsid.cvut.cz/assets/subject/files/105/def-kontrola-sv.pdf>
42. Schematic Representation of Weld Defects. In: Aircraft plasma [online]. 2016, 16.11. 2016 [cit. 2019-04-22]. Dostupné z: <http://aircraftplasma.blogspot.com/2016/11/schematic-representation-of-weld-defects.html>
43. FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie: Materiálový koncept – Škoda Octavia III. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, 2017, 08.03.2017, , 90 [cit. 2019-05-01]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie.html>
44. OEE (Overall Equipment Effectiveness). In: Lean Production [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.leanproduction.com/oee.html>
45. MRŇA, Libor. Speciální metody svařování: Vysokofrekvenční svařování. In: Odbor technologie svařování a povrchových úprav: Studijní opory [online]. Brno [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_vysokofrekvenčni_svarovani_mrna.pdf
46. ZVÁRANIE–SVAŘOVÁNÍ. Bratislava: Výskumný ústav zvaračský, 2018, 67(1). ISSN 0044-5525.
47. SWARUP, Gap. Laser and Electron Beam Welding Part II. In: Textofvideo [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://textofvideo.nptel.ac.in/112103244/lec7.pdf>
48. HERNÁNDEZ, Sinuhé. Laser welding of hardenable steel [online]. Sweden, 2010 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1023039/FULLTEXT01.pdf>. Master's Thesis. Lulea University of Technology.
49. Electron beam welding, EBW. In: MANUFACTURING GUIDE [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-welding-ebw>
50. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING): Princip laserového svařování. In: Lao [online]. Praha, 2011, 15.7.2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/mobile/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
51. ŠEBESTOVÁ, Hana, Libor NOŽKA, Hana CHMELÍČKOVÁ, Lenka ŘIHÁKOVÁ, Martin HAMAR a Václav MICHÁLEK. Spektroskopické monitorování procesu

- svařování pulsním laserem. AF-NET [online]. 2013, 28. 11. 2013 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: [ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/2013-11-28%20Propagace%20Sebestov%C3%A1%20\(1\)/Prez-Sebestova_seminar_UPT.pdf](ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/2013-11-28%20Propagace%20Sebestov%C3%A1%20(1)/Prez-Sebestova_seminar_UPT.pdf)
52. Kondukční svařování. TRUMPF: Svařování laserovým paprskem [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/kondukcní-svarovani/
 53. Hluboké svařování. TRUMPF: Svařování laserovým paprskem [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hluboke-svarovani/
 54. Fiber Laser Welder: Welding Image. In: Avio [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.avio.co.jp/english/products/assem/lineup/laser/fiber.html>
 55. Bodové svařování a švové svařování laserem. In: TRUMPF: Svařování laserovým paprskem [online]. Praha [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/bodove-a-svove-svarovani/
 56. KESSE, Martin Appiah. Laser-TIG hybrid welding process [online]. Lappeenranta, 2013 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/91432/Laser-TIG%20hybrid%20welding%20process.pdf?sequence=2>. Diplomová práce. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Jukka Martikainen.
 57. ŠEBESTOVÁ, Hana. Hybridní metody svařování. In: Portal of modern physics: Úvod do moderních technologií 1 [online]. Olomouc [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_hybridni_svarovani.pdf
 58. Laserové technológie. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 8022714259.
 59. JÄGER, Aleš a Viera GÄRTNEROVÁ. Elektronovým mikroskopem do nitra materiálů aneb jak vypadá jejich struktura. In: FZU [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/elektronovym-mikroskopem-do-nitra-materialu-aneb-jak-vypada-jejich-struktura>
 60. KUBÍNEK, Roman, Klára ŠAFÁŘOVÁ a Milan VŮJTEK. Elektronová mikroskopie [online]. Olomouc: Univerzita Palackého, 2011 [cit. 2019-05-07]. ISBN 978-80-244-2739-3. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/elmikro.pdf>
 61. VODÁREK, Vlastimil. Metody studia struktury [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2012 [cit. 2019-05-08]. ISBN 978-80-248-2559-5. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/MSS/Metody%20studia%20struktury.pdf>
 62. SOUCEK, Pavel. Analýza vrstev pomocí elektronové spektroskopie a podobných metod. In: <http://physics.muni.cz/> [online]. 2010, 1. 4. 2010 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: http://physics.muni.cz/~dorian/Soucek_Elektronova_mikroskopie.pdf

63. Analýza tenkých vrstev pomocí přístrojů PHI: Augerova elektronová spektroskopie. In: Physical electronics [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.edlin.cz/phi-auegerova-elektronova-spektroskopie-aes.html>
64. RAMACHANDIRAN, Nivas. What is the 'heat affected area' in welding?. In: Quora [online]. 2015, 21.11. 2015 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-heat-affected-area-in-welding>
65. ŠAFÁŘOVÁ, Klára. SKENOVACÍ (RASTROVACÍ) ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE. In: Nanosystémy [online]. Olomouc [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: http://nanosystemy.upol.cz/download/2009/12-ws/safarova_sem.pdf
66. ČSN EN 1011-1 Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování Praha: 2009-03-01. 16s. Třídící znak 05 2210
67. KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - HLAVNÍ TYPY LASERŮ POUŽÍVANÝCH V PRŮMYSLU: Základní přehled průmyslových laserů. In: Lao [online]. Praha, 2013, 19. 02. 2013 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
68. Princip vláknového - FIBER LASERU [online]. In: . [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
69. BENKO, Bernard, Petr FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. Laserové technologie. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 8022714259.
70. VÁZQUEZ, Rodrigo Gómez, Holger M. KOCH a Andreas OTTO. Multi-physical Simulation of Laser Welding. Physics Procedia [online]. 2014, 56(8), 1334-1342 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1016/j.phpro.2014.08.059. ISSN 18753892. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875389214002041>
71. DULEY, Walter W. Laser welding. 1. New York: Wiley, c1999. ISBN 0471246794.
72. Elektronová mikroskopie a mikroanalýza-3. In: Informační systém Masarykovy univerzity [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2012/G7531/um/03_Elektronova_mikroskopie_a_mikroanalýza.pdf
73. MELECHOVSKÝ, Ondřej. Ionizační detektor pro environmentální rastrovací elektronový mikroskop. Brno, 2019. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88458. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie. Vedoucí bakalářské práce Josef Jiráček.
74. Svařování laserovým paprskem. In: Trumpf [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/

75. ŠEBESTOVÁ, Hana, Petr HORNÍK, Libor MRŇA a Pavel DOLEŽAL. Microstructure and mechanical properties of hybrid LasTIG welds of HSLA steel. *Procedia CIRP*. Brno, 2018, 74, 743-747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.019>. ISSN 2212-8271. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118308023>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
BSE	Zpětně odražené elektrony	[-]
CEZ	Celková efektivnost zařízení	[-]
EDX/EDS	Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy	[-]
FSW	Friction Stir Welding	[-]
HSS	High Strenth Steel	[-]
IIW	Mezinárodní svářečský institut	[-]
LATIG	Laser-TIG	[-]
LEAN	Štíhlá výroba	[-]
OEE	Overall Equipment Effectiveness	[-]
SE	Sekundární elektrony	[-]
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	[-]
TB	Přístřih na míru	[-]
TEM	Transmisní elektronový mikroskop	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
ÚPT	Ústav přístrojové techniky	[-]
O _L	Odpisy pro Laser IPG YLS 2000	[Kč]
O _R	Odpisy pro robota ABB IRB 2400/16	[Kč]
O _T	Odpisy pro TIG Fronius MagicWave 1700	[Kč]
P _L	Ochranný plyn varianta Laser	[Kč/hod]
P _{LT}	Ochranný plyn varianta LATIG	[Kč/hod]
M	Mzda operátora	[Kč/hod]
E _L	Elektrická energie Laser	[Kč/hod]
E _T	Elektrická energie LATIG	[Kč/hod]

\dot{U}_L	Údržba pracoviště Laseru	[Kč/hod]
\dot{U}_{LT}	Údržba pracoviště LATIG	[Kč/hod]
R	Režie	[%]
Z	Zisk	[%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Srovnání výroby karoserie [2].....	9
Obr. 2 CEZ ve světě [3]	9
Obr. 3 Použití TB v karoserii Škoda Octavia III [12]	10
Obr. 4 Nezbytná úprava pro hluboké tažení z polotovaru s rozdílnou tloušťkou [1].....	13
Obr. 5 Schematický princip výroby TB [2].....	13
Obr. 6 Svařování metodou FSW [6].....	14
Obr. 7 Švové svařování [15]	14
Obr. 8 Svařování svazkem elektronů [17].....	14
Obr. 9 Svařování vysokými frekvencemi [18]	15
Obr. 10 Laserové svařování [19].....	15
Obr. 11 Svařování metodou LATIG [25].....	15
Obr. 12 Předehřev plamenem [20]	16
Obr. 13 Indukční předehřev [24].....	16
Obr. 14 Předehřev elektrickým obloukem [24].....	16
Obr. 15 Vliv technologie na velikost TOO [23].....	17
Obr. 16 Svarový spoj [29], [64]	18
Obr. 17 Rozdělení vlnových délek [29], [23].....	19
Obr. 18 Kondukční a penetrační režim [50].....	19
Obr. 19 Pulzní a kontinuální režim [54].....	20
Obr. 20 Schéma vláknového laseru [67]	21
Obr. 21 Teplotní cyklus laserového svařování [48]	22
Obr. 22 Schéma svařovací metody TIG [56]	23
Obr. 23 Schéma svařovací metody LATIG [57]	25
Obr. 24 Svařitelnost kovu [30]	26
Obr. 25 Rozdělení svarových zkoušek [41]	30
Obr. 26 Vady svarů [42].....	31
Obr. 27 Rozsah jednotlivých mikroskopů [59]	32
Obr. 28 Rozdělení elektronové mikroskopie [59].....	32
Obr. 29 Rozsah jednotlivých mikroskopů [65]	33
Obr. 30 Rozsah jednotlivých mikroskopů [63]	34
Obr. 31 Svařený vzorek 6 před přebroušení elektrody.....	38
Obr. 32 Svařený vzorek 6A po přebroušení elektrody.....	38
Obr. 33 Svařený vzorek 7 bez provaření kořene.....	38
Obr. 34 Svařený vzorek 7A bez provaření kořene	38
Obr. 35 Vzorek 1	39
Obr. 36 Vzorek 5.....	39
Obr. 37 Vzorek 2	40
Obr. 38 Vzorek 6.....	40
Obr. 39 Vzorek 3.....	41
Obr. 40 Vzorek 7.....	41
Obr. 41 Vzorek 6A.....	41
Obr. 42 Vzorek 7A.....	41
Obr. 43 Vzorek 4.....	42
Obr. 44 Vzorek 8.....	42
Obr. 45 Vzorek 1 Domex 460 MC základní materiál	42
Obr. 46 Vzorek 1 Domex 700 MC základní materiál	43
Obr. 47 Vzorek 1 svar	43
Obr. 48 Vzorek 2 S355J2 základní materiál	43

Obr. 49 Vzorek 2 svar	43
Obr. 50 Vzorek 3 DC01 základní materiál	44
Obr. 51 Vzorek 3 svar	44
Obr. 52 Vzorek 4 Domex 460 MC základní materiál	44
Obr. 53 Vzorek 4 svar	44
Obr. 54 Vzorek 5 Domex 700 MC základní materiál	45
Obr. 55 Vzorek 5 svar	45
Obr. 56 Vzorek 6 S355J2 základní materiál	45
Obr. 57 Vzorek 6 svar	45
Obr. 58 Vzorek 7 DC01 základní materiál	46
Obr. 59 Vzorek 7 svar	46
Obr. 60 Vzorek 8 TOO	46
Obr. 61 Vzorek 8 svar	46
Obr. 62 Vzorek 1 prvková mapa Mn	48
Obr. 63 Vzorek 5 prvková mapa Mn	48
Obr. 64 Vzorek 2 prvková mapa Mn	50
Obr. 65 Vzorek 6 prvková mapa Mn	50
Obr. 66 Vzorek 3 prvková mapa Mn	51
Obr. 67 Vzorek 7 prvková mapa Mn	51

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Chemické složení materiálu Domex 460 MC	11
Tab. 2 Chemické složení materiálu Domex 700 MC	11
Tab. 3 Chemické složení materiálu S355J2	12
Tab. 4 Chemické složení materiálu DC01	12
Tab. 5 Mechanické vlastnosti materiálu Domex 460 MC.....	12
Tab. 6 Mechanické vlastnosti materiálu Domex 700 MC.....	12
Tab. 7 Mechanické vlastnosti materiálu S355J2.....	12
Tab. 8 Mechanické vlastnosti materiálu DC01	12
Tab. 9 Porovnání typů laserů [4], [8], [35], [58], [67]	20
Tab. 10 Rozdělení skupin svařitelnosti [31], [33].....	26
Tab. 11 Vypočítané parametry pro Domex 700 MC a S355J2	36
Tab. 12 Vzorky svařené laserem	38
Tab. 13 Vzorky svařené metodou LATIG	38
Tab. 14 Rozměry svaru	40
Tab. 15 Vstupní parametry pro technicko–ekonomické zhodnocení	60

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Atesty materiálů
- Příloha 2 Makrostruktura vzorků
- Příloha 3 Mikrostruktura vzorků

voestalpine
Steel & Service Center
GmbH

ein 100% Tochterunternehmen
der voestalpine Stahl GmbH

A02
Abnahmeprüfzeugnis
Inspection certificate

3.1 - EN 10204

Seite
Page

1 von 2
1 of 2

16-03-2016
Date

A01
voestalpine
Abnahme-Prüfung
voestalpine-Strasse 3
4020 Linz, Austria
www.voestalpine.com/stahl

A03 Bezeichnung-Nr.: Document Number	W1342078/A	A08 Auftrag-Nr.: Order No.	8452729	A07 Best.Nr.: Order Ref.	21-01-2016	Versanddatum: Date of dispatch	16-03-2016	QF
A06 Besteller Customer	B01 Fabrikat Product	B01 HOT ROLLED SHEETS WARMGEM. TAFELBLECH						
A07 Best.Nr.: Order No.	B02 Verstärk Material	S700MC						
A08 Empfänger Consignee								
A10 - Ergänzende Angaben - Supplementary information FORM- UND MASSTOLERANZNORM EN10051								

Z01 - Beschreibung und Maßprüfung: keine Beanstandung. Wir bestätigen, dass die oben bezeichnete Lieferung den Bestellvorschriften (Normvorschriften) entspricht.
Z01 - K e n n z e i c h n u n g : Erhmelzungsart (wenn spezifiziert), Markenbezeichnung, Schmelznummer, Band-Blechnummer.
Z01 - M a r k i n g : Steelmaking Process (if specified), Grade of Material, Cast-Number, Plate-Number
Z01 - Visual Examination and dimensional checking: satisfactory. We herewith certify that the above mentioned delivery complies with the purchasing requirements (standard specifications).

Umfang der Lieferung - Detail of supply															
B07 Schmelze Heat No.	B06 Block-Nr Cott No.	Dimensionen - Dimensions				B08 Stück Piece	B11 Länge Length	B12 Brutto Gross	B13 B14 Netto Lief.-Nr Net Disp-No	B15 kg	B16 kg	B17 kg			
		B09 Fol. Dicke Item Thickness	B10 Breite Width	B11 Länge Length	B12 Brutto Gross										
962718	788267	20	3,00	1500,0	6000	88	18.972	18.904	23505						
Summen - Sum						88	18.972	18.904							
C70 - Erhmelzungsverfahren: LD - Method of steelmaking: pure oxygen blown															
Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) - Chemical composition (Heat analysis)															
B07 Schmelze Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti	B	
962718		.065	.024	1.880	.008	.0009	.044	.028	.023	.010	.020	.008	.050	.136	0.0002

A04
Herstellerzeichen
Symbol of the manufacturer's work

voestalpine

A01 A05 Z02
Abnahmebeauftragte(r) des Herstellers
Inspection representative
Quality control dept. hot strip production
S. Wurzenberger
Tel.: +43/50304/15/77264

voestalpine

EINEN SCHRITT VORAUSS.

AB3 Bezeichnung-Nr.: Drawing number	W1342078/A	AB5 Auftrag-Nr.: Order-Nr.:	8452729	Z02 Datum Date	16-03-2016	Seite Page	2 of	2
Ergebnisse der Prüfungen - Test results								
Versuch Test	Zugvers. Tensile	Kerbschlagbiegeversuch						
B06 Blech-Nr	C02	C11	C12	C13	C02	C10	C03	C42 C42 C42
Coil No	Lage L0	Rp0,2	Rm	A	Lage	Fz	Temp EW	EW EW
	Dir L0	Ip	IS	E	Dir	shape	Temp SV	SV SV
		NPA	NPA	%			GRD C	J J J
788267	L	A5	772	796	20.4	L	CV 10 x t	-40 33 34 34
Anmerkungen - Remarks								
Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an: Herrin Jürgen Hengstschläger, Telefon 0043 50304 15 6792 If there are any questions, please contact: Mr. Jürgen Hengstschläger, phone 0043 50304 15 6792								

A04
Herstellerzeichen
Symbol of the manufacturer's work
voestalpine

A01.A05.Z02
Abnahmebeauftragte(r) des Herstellers
Inspection representative
Quality control deptn. hot strip production
S. Wurzenberger
Tel.: +43/50304/1577264

voestalpine
EINEN SCHRITT VORAUSS.

TEST REPORT: 2.2 EN 10204:2004
- izveštaj o ispitivanju

PAGE No: 1
(strana br):

PURCHASER: PIKARO TRADING, SE
(kupac) KOŠICE

CERTIFICATE No: 89518
(uverenje broj)

TRADING CO: RAVEN A.S.
(izvoznik, POVAZSKA BYSTRICA
(primalac) SOLTESOVEJ 420/2

UGOVOR KUPCA NO901802718,
CONTRACT No. RAVS4088SK
(ugovor broj.)

PRODUCT: COLD ROLLED COILS
(proizvod)

T: CR

DIMENSIONS: 1,500 X 1500 X
(dimenzije, mm) EN 10131/2006

DATE OF ISSUE 04/09/2018
(dat.izdavanja)

QUALITY: DC01
(kvalitet): EN 10130/2006

Net Weight (kg): 21880

QUALITY AND SURFACE CONDITION: A M
(kvalitet i stanje površine)

Transport: BG1268TH

MECHANICAL PROPERTIES - MEH.TEH.OSOBINE									
COIL No,	HEAT No								
PACK No,	Šarža br								
					Cold			Fi	Melt
(kotur br.)					A bend	Erich	Hardness	sh	furn
(paket br.)		Re	Rm	Re/	Elong	test	izv.	(tvrdoća)	its
				Rm	gati	S		sc	r n
					on	----	----	-----	al
		MPa	MPa		%	1180°	1mm	HRB	HRF HR30T1B2
720012	867454	257	353	,73	35				Y
720032	867453	238	332	,72	37				Y

	CHEMICAL COMPOSITION	OF HEAT -	HEMIJSKI SASTAV	SARZE	(%)
	867454		867453		
	-----		-----		
C	0,07		0,07		
Mn	0,39		0,38		
Si	0,007		0,008		
P	0,007		0,008		
S	0,008		0,007		
Al	0,038		0,037		
Cu	0,03		0,03		
Cr	0,02		0,03		
Ni	0,01		0,01		
Mo	0,005		0,004		
Ti	0,001		0,001		
V	0,001		0,001		
Nb	0,002		0,001		
N	0,005		0,004		
As	0,002		0,002		

Measured values of alpha and beta/gamma surface contamination of the examined goods are for alpha emitters lower than 4 Bq/100cm², as well as for beta/gamma emitters lower than 40 Bq/100cm²

We hereby declare that above mentioned products were manufactured in accordance with specifications and contract requirements.

Statement of compliance with the order, with indication of results of non-specific inspection

HBIS GROUP Serbia
Iron & Steel d.o.o. Beograd
Odeljenje za ateste
AO-04

QUALITY ASSURANCE
OBEZBEDJENJE KVALITETA

PŘÍLOHA 1



SIA "Severstal Distribution", Starta 13, Rīga, LV-1039, Latvija

KVALITĀTES SERTIFIKĀTS
СЕРТИФИКАТ КАЧЕСТВА
CERTIFICATE OF QUALITY

 Pārbaudes sertifikāts
 Отчет об испытании
 Test report

EN 10204:2004 2.2

KLIENTS КЛИЕНТ CUSTOMER Severstal Distribution SIA	TEHNOLÓGISKĀ KARTE ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА WORK ORDER RBS1282br1
	SPECIFIKĀCIJA СПЕЦИФИКАЦИЯ SPECIFICATION TR 2017

PIEGĀDES STĀVOKLIS СОСТОЯНИЕ ПОСТАВКИ DELIVERY CONDITION

PRECES APRAKSTS НАИМЕНОВАНИЕ ТОВАРА DESCRIPTION OF GOODS		TĒRAUDA MARKA МАРКА СТАЛИ STEEL GRADE	STANDARTS СТАНДАРТ STANDARD	IERAKOJUMA VEIDS ВИД ГРУЗ. МЕСТА TYPE OF PACKAGES	
AUKSTI VĒLMĒTĀ TĒRAUDA LOKSNES ХОЛОДНОКАТАННАЯ СТАЛЬ В ЛИСТАХ COLD ROLLED STEEL SHEETS		DC01	EN 10130-06 EN 10131-06	Paka Пачка Bundle	
Nr	Kausējuma Плавка Heat	Izmēri mm Размеры мм Dimensions mm	Paku skaits gab. Количество пачек шт. Number of bundles pcs.	Loksnu skaits gab. Количество листов шт. Number of sheets pcs.	Neto svars kg Вес нетто кг Net weight kg
1	D37110	3 x 1000 x 2000	5	250	11 700
			5	250	11 700

PRECES KVALITĀTES RĀDĪTĀJI ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТОВАРА QUALITY CHARACTERISTICS OF GOODS

KĪMISKAIS SASTĀVS																ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ						CHEMICAL COMPOSITION					
Kausējums Плавка Heat	C % x100	Si % x100	Mn % x100	P% x1000	S % x1000	Cr % x100	Ni % x100	Cu % x100	Al % x100	Mo % x100	Ti % x1000	Nb% x1000	V % x100	N2 % x1000	CEV %												
D37110	4.1	0.9	20	5	11																						
MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS																МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА						MECHANICAL PROPERTIES					
Kausējums Плавка Heat	Tecēšanas robeža Предел текучести Yield strength Re [Mpa]			Sagrāves izturības robeža Предел прочности Tensile strength Rm [Mpa]			Relatīvais pagarinājums [G.L. 80 mm] Относит. Удлинение [G.L. 80 mm] Relative elongation [G.L. 80 mm]			Virsmas grupa Группа поверхности Surface group		Virsmas apdare Отделка поверхности Surface finish		Piezīmes Примечание Notes													
D37110	197			311			38			A		m															

 Sertifikāta izdošanas datums:
 Дата выдачи сертификата:
 Date of issue and validation:

10.08.2017

 Apstiprināja:
 Утвердил:
 Approved by:

Svetlana Bičkova

 Dokumenta noformēšanas centra datu administrators
 Администратор данных центра оформления документов
 Document Processing Center Administrator

HBIS GROUP Serbia Iron & Steel Ilc Belgrade, Bulevar Mihajla Pupina 6,
Belgrade-New Belgrade,
11000 Belgrade, Republic of Serbia

TEST REPORT: 2.2 EN 10204:2004
- izveštaj o ispitivanju

PAGE No: 1
(strana br):

PURCHASER: PIKARO TRADING, SE
(kupac) KOŠICE
PROTIFAŠISTICKYCH BOJOVNIKOV 11
TRADING CO: RAVEN CZ, A.S.
(izvoznik, HRADEC-KRALOVE
(primalac) ZA SKODOVKOU 838
PRODUCT: COLD ROLLED SHEETS
(proizvod)
DIMENSIONS: 2,000 X 1500 X 3000
(dimenzije, mm) EN 10131/2006
QUALITY: DC01
(kvalitet): EN 10130/2006
Net Weight (kg): 5600
QUALITY AND SURFACE CONDITION: A M
(kvalitet i stanje površine) Transport: SO083CN

CERTIFICATE No: 99925
(uverenje broj)

UGOVOR KUPCA NO101802167
CONTRACT No. RAVC2098CZ
(ugovor broj.)

T: CR

DATE OF ISSUE 09/10/2018
(dat.izdavanja)

! MECHANICAL PROPERTIES - MEH.TEH.OSOBINE !
! COIL No, ! HEAT No!-----!
! PACK No, !šarža br! ! ! ! Cold! ! ! Fi! ! ! Melt!
! (kotur br.! ! ! ! A !bend!Erich! Hardness !sh! ! ! furn!
! paket br)! ! Re ! Rm !Re/ !Elon!test! izv.! (tvrdoca)!ts! ! !
! ! ! ! Rm!gati! S ! ! ! scl r! n !nac!
! ! ! ! on !----!-----!al! ! ! pro.
! ! !MPa !MPa ! ! % !180°!mm HRB HRF HR30T!B2! ! !

! E44900 868148 224 332 ,67 39 Y !
! E44901 868148 224 332 ,67 39 Y !

! CHEMICAL COMPOSITION OF HEAT - HEMIJSKI SASTAV SARZE (%) !

! 868148 !
! ----- !
! C 0,07 !
! Mn 0,38 !
! Si 0,008 !
! P 0,008 !
! S 0,006 !
! Al 0,032 !
! Cu 0,02 !
! Cr 0,02 !
! Ni 0,01 !
! Mo 0,004 !
! Ti 0,001 !
! V 0,001 !
! Nb 0,001 !
! N 0,005 !
! As 0,002 !

Measured values of alpha and beta/gamma surface contamination of the examined goods are for alpha emitters lower than 4 Bq/100cm², as well as for beta/gamma emitters lower than 40 Bq/100cm²

We hereby declare that above mentioned products were manufactured in accordance with specifications and contract requirements.

Statement of compliance with the order, with indication of results of non-specific inspection

HBIS GROUP Serbia
Iron & Steel d.o.o. Beograd
Odeljenje za ateste
AO-04

QUALITY ASSURANCE
OBEZBEDJENJE KVALITETA

ALFUN

Dodavatel / Supplier:

ALFUN a.s.Zahradní 1610/40
79201 BRUNTÁL

IČ: 25828649 DIČ: CZ25828649

Společnost zapsaná v OR KS Ostrava, oddíl B, vložka
2732

Kontaktní osoba odběratele / Contact person of buyer:

Novotný Josef

FAX:

INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT 3.1 (EN 10204) OPIS
INSPECTION CERTIFICATE 3.1 (EN 10204) COPY

Interní kód atestu / Internal certificate code	: AT18112126	Výrobce / Producer	: ArcelorMittal Commercial CZ, k.s.
		Země původu / Country of origin	: DE
Zákazník / Customer	: AQUAdem, s.r.o. (Tovární 739/1 Brno-Chrlice, 643 00)		
Číslo objednávky / Order number	: OV18-3250		
Číslo dodacího listu / Packing list number	: DL181044039		
Zhotovil / Issued by	: Truchlíková Markéta	Dne / Date	: 20.12.2018

Atest:AT18112126**Opis atestu (Copy of inspection cert.)**

Tavba (Heat No.) Datum zhotovení (Date)

184174 08.08.2018

Obsažené prvky (Contained elements)

C	Mn	Si	P	Al	S	N
0,059	0,336	0,011	0,007	0,034	0,004	
Nb	Ti	Cu	V	Mo	B	
0,032	0,001		0,001			

Mechanické hodnoty (Mechanical properties)

Rm [MPa]	Re [MPa]	A	A80	Tvrdost HB
467	404	32,9		

Vlastnosti materiálu dle (Following standards) EN 10149 2, EN10051**Charakteristika materiálu / Material characteristics**

Jakost / Grade, Rozměry[mm] / Dimension[mm]

S355MC 3.0x1500x3000 mořený

Popis materiálu / Material specification: 2x20 ks

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavil ALFUN a.s. k dodacímu listu č.: DL181044039, jednoznačným údajem pro přiřazení je č. tavby: 184174. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem. / This copy of an inspection document was issued by ALFUN a.s. as the attachment to the delivery note n.: DL181044039, with its definite and unequivocal data for the assignment to the melting n.: 184174. Instructions in the QMS guarantee the connection between the original document and delivered product

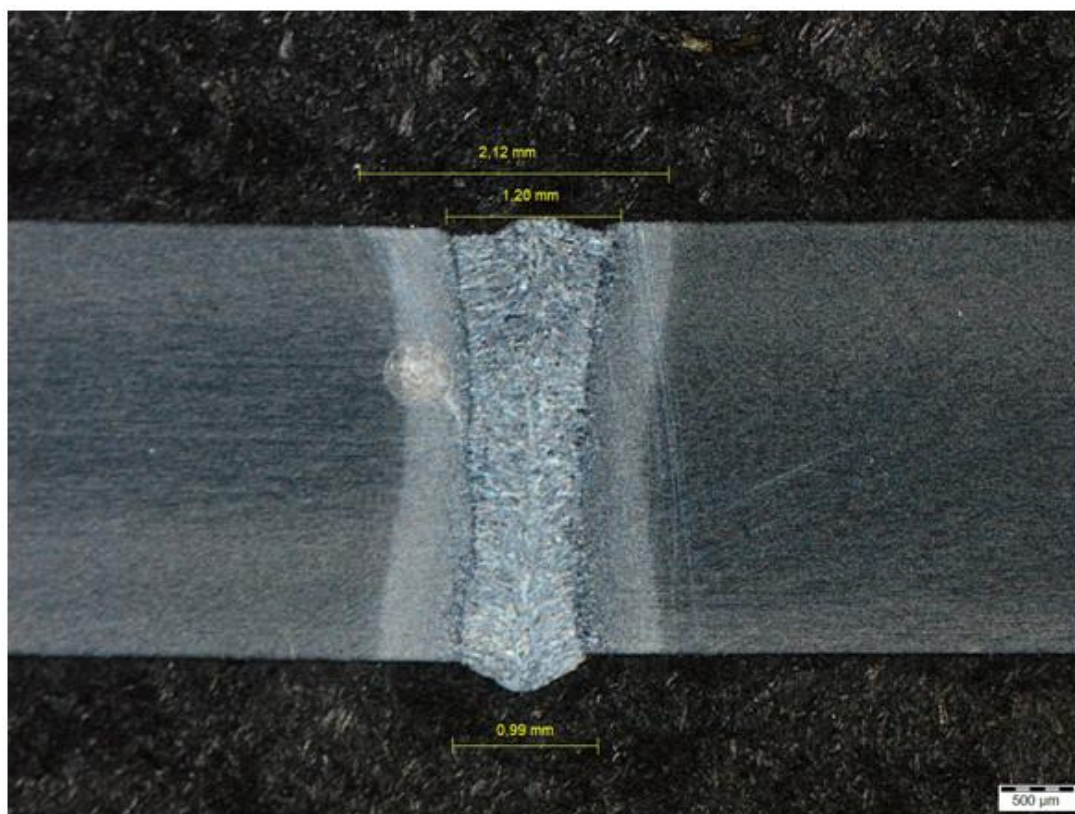
Za správnost údajů odpovídá / Person responsible for the accuracy of data above:

Truchlíková
Markéta

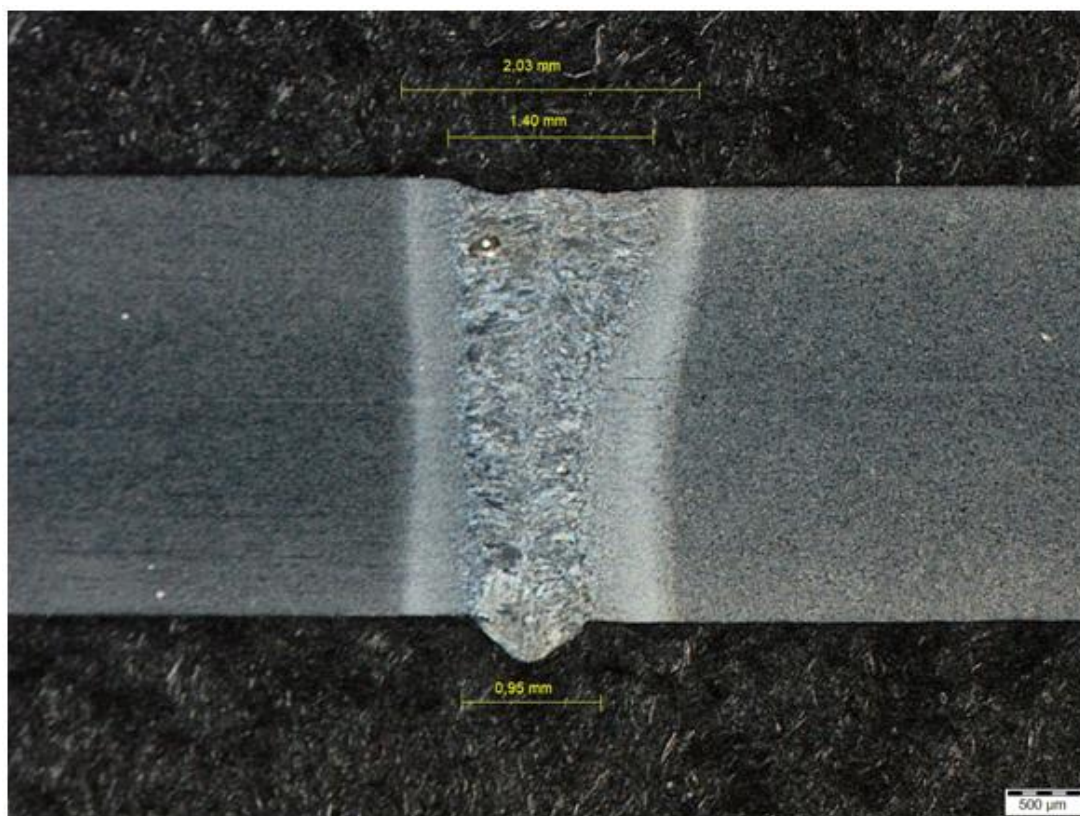
Podpis / Signature

ALFUN
ALFUN A.S.
ZAHRADNÍ 1610/40
792 01 BRUNTÁL, CZ
IČO: 25828649
DIČ: CZ25828649

Příloha 2

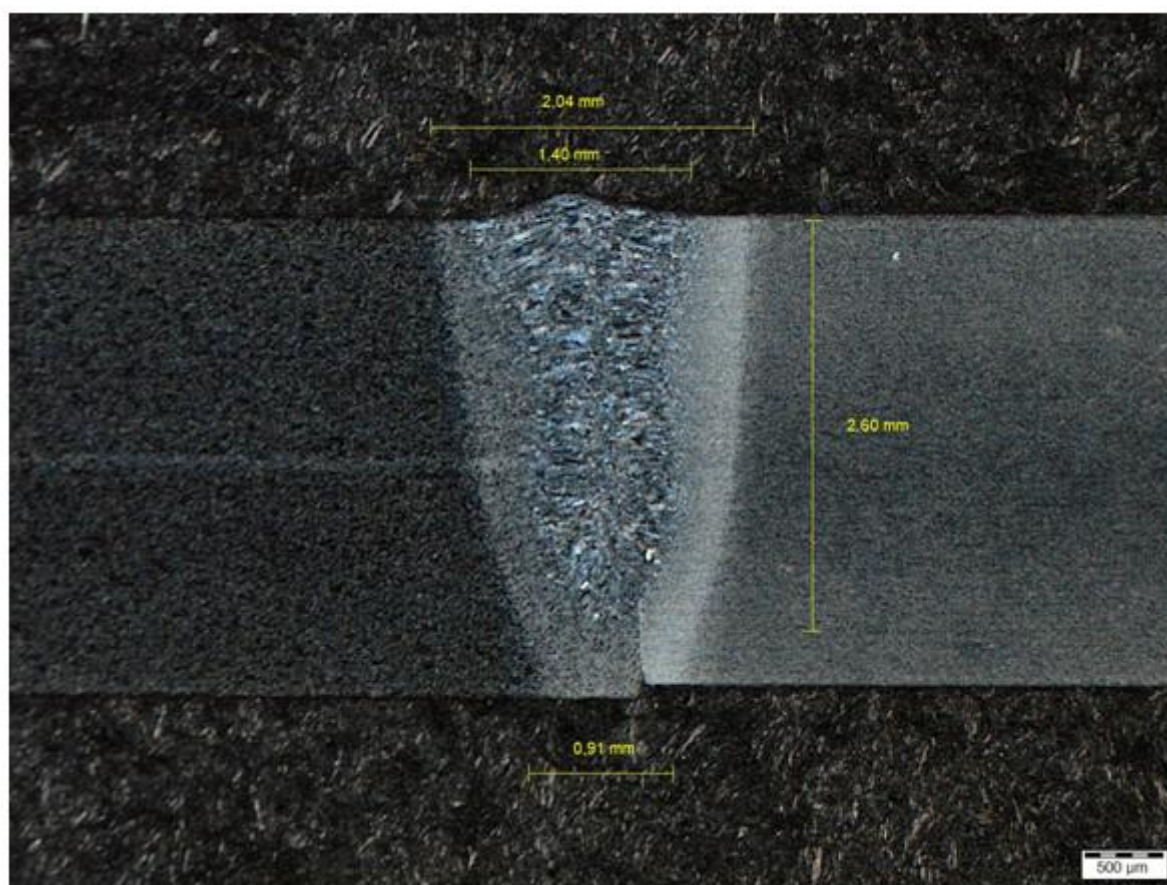


Makrostruktura vzorku č. 1

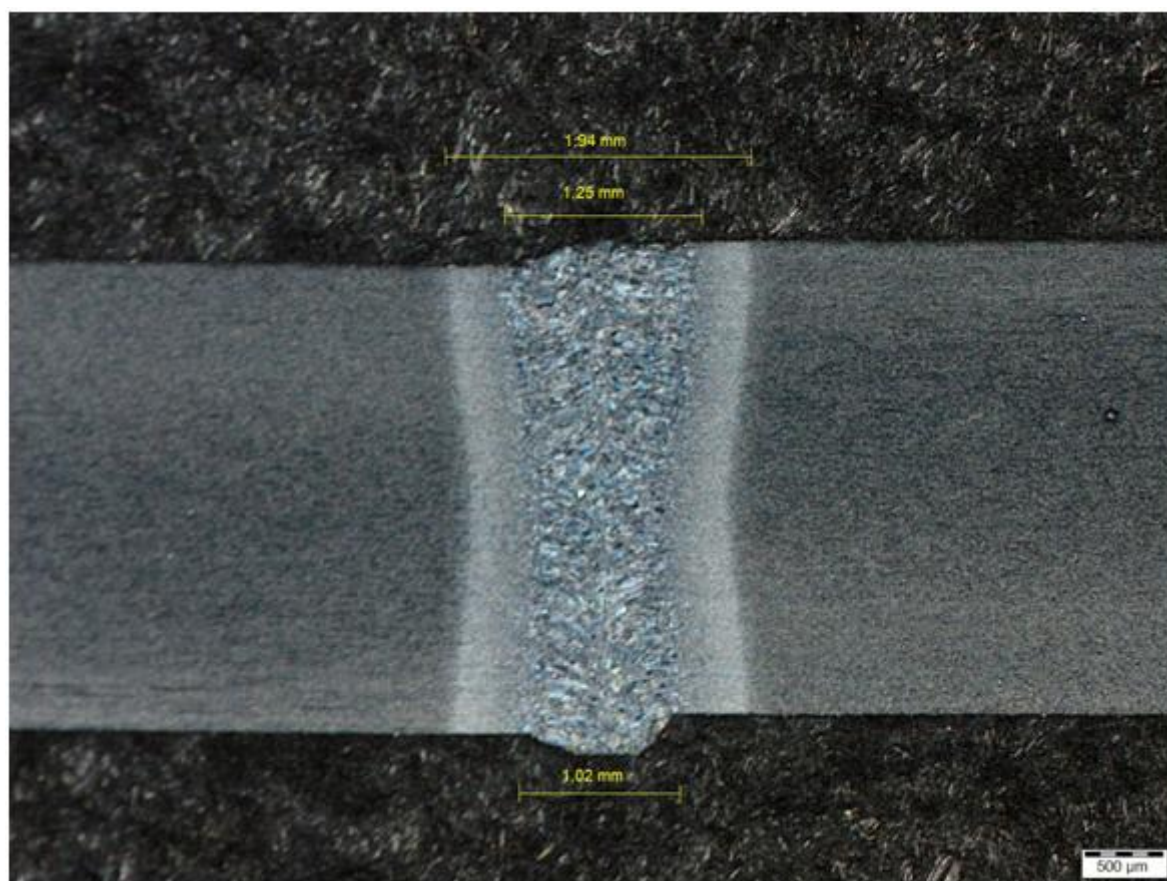


Makrostruktura vzorku č. 2

Příloha 2

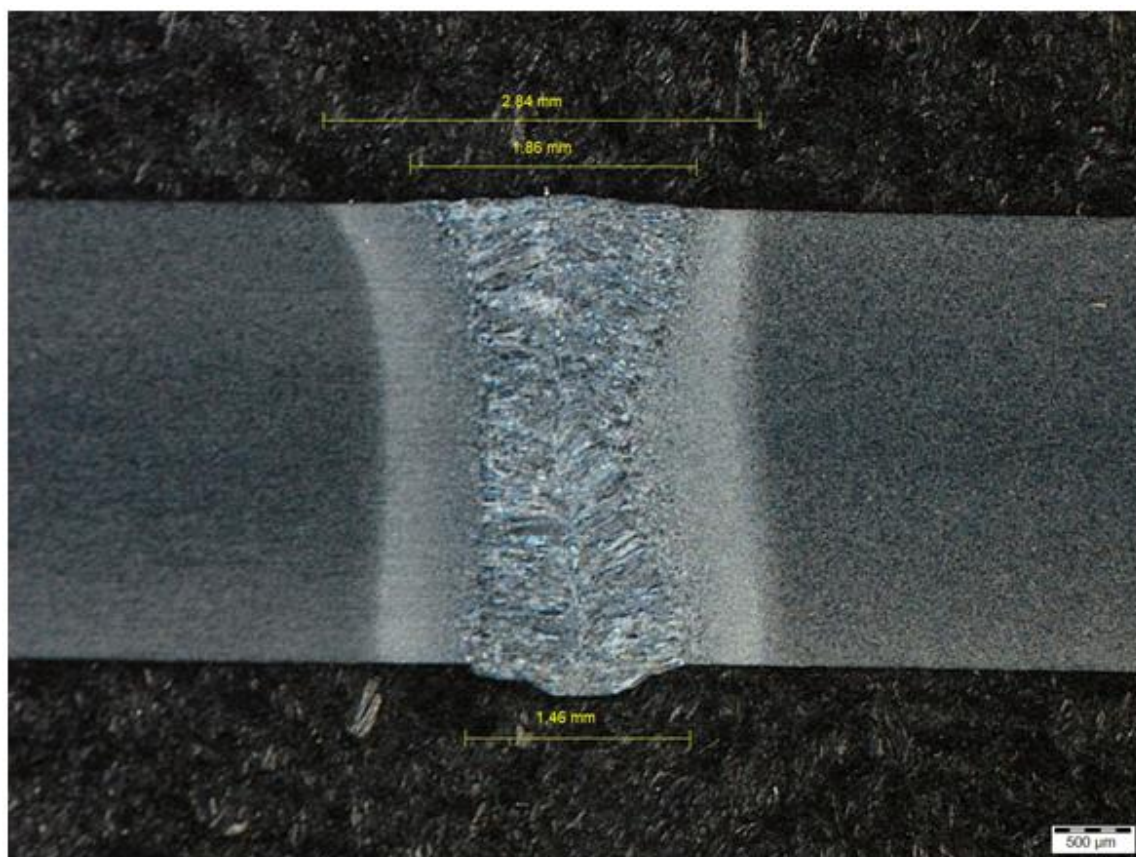


Makrostruktura vzorku č. 3

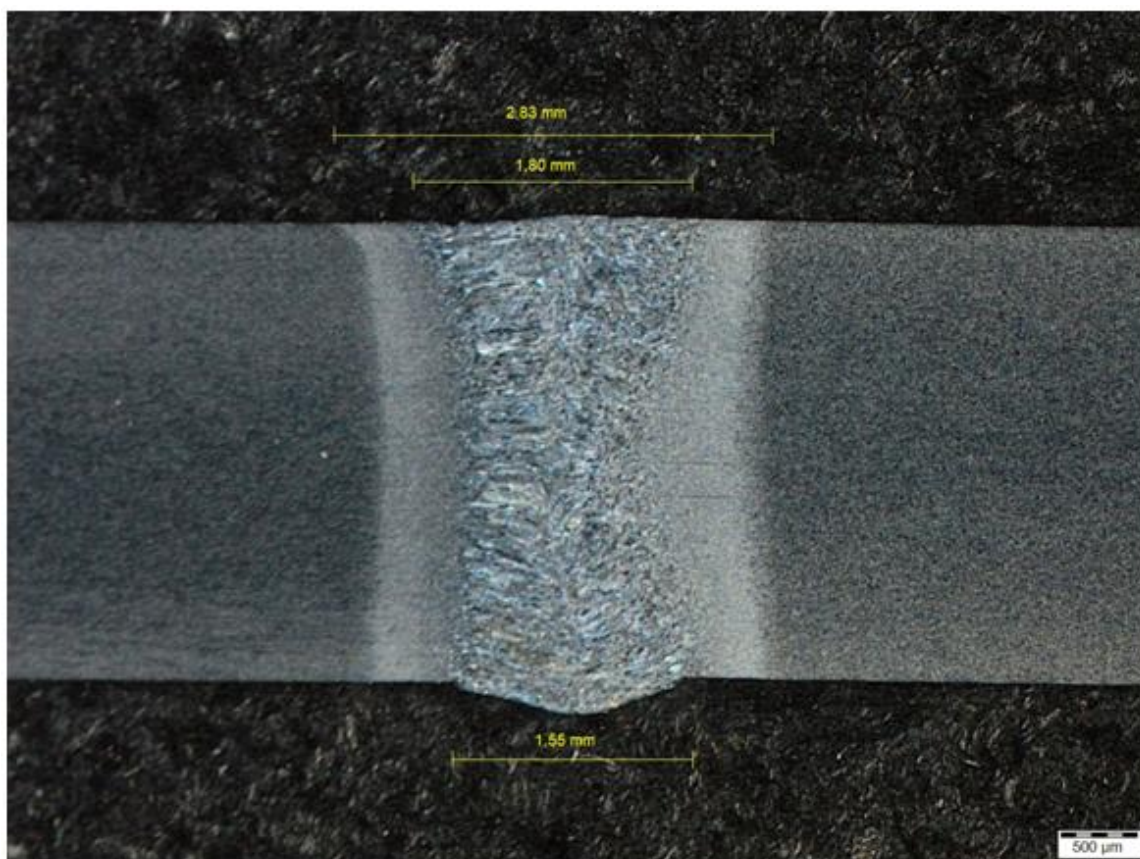


Makrostruktura vzorku č. 4

Příloha 2

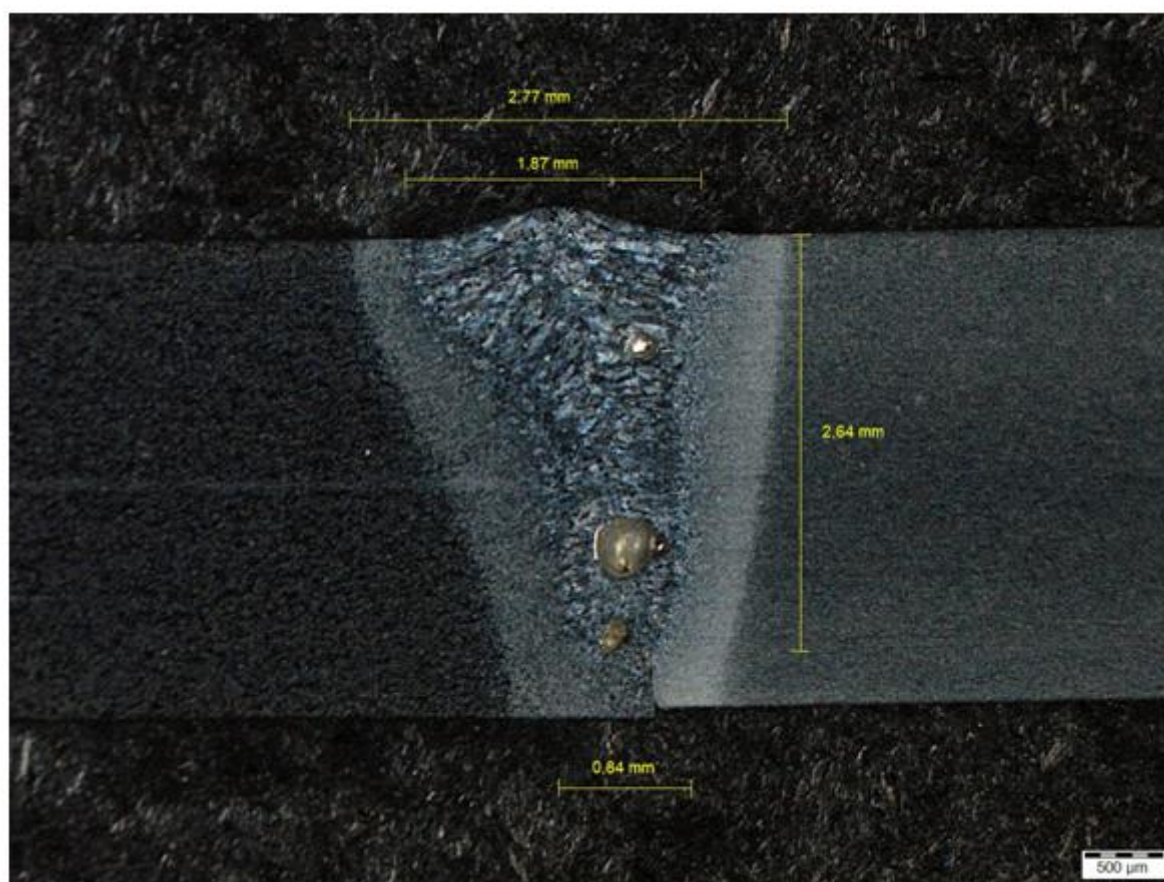


Makrostruktura vzorku č. 6

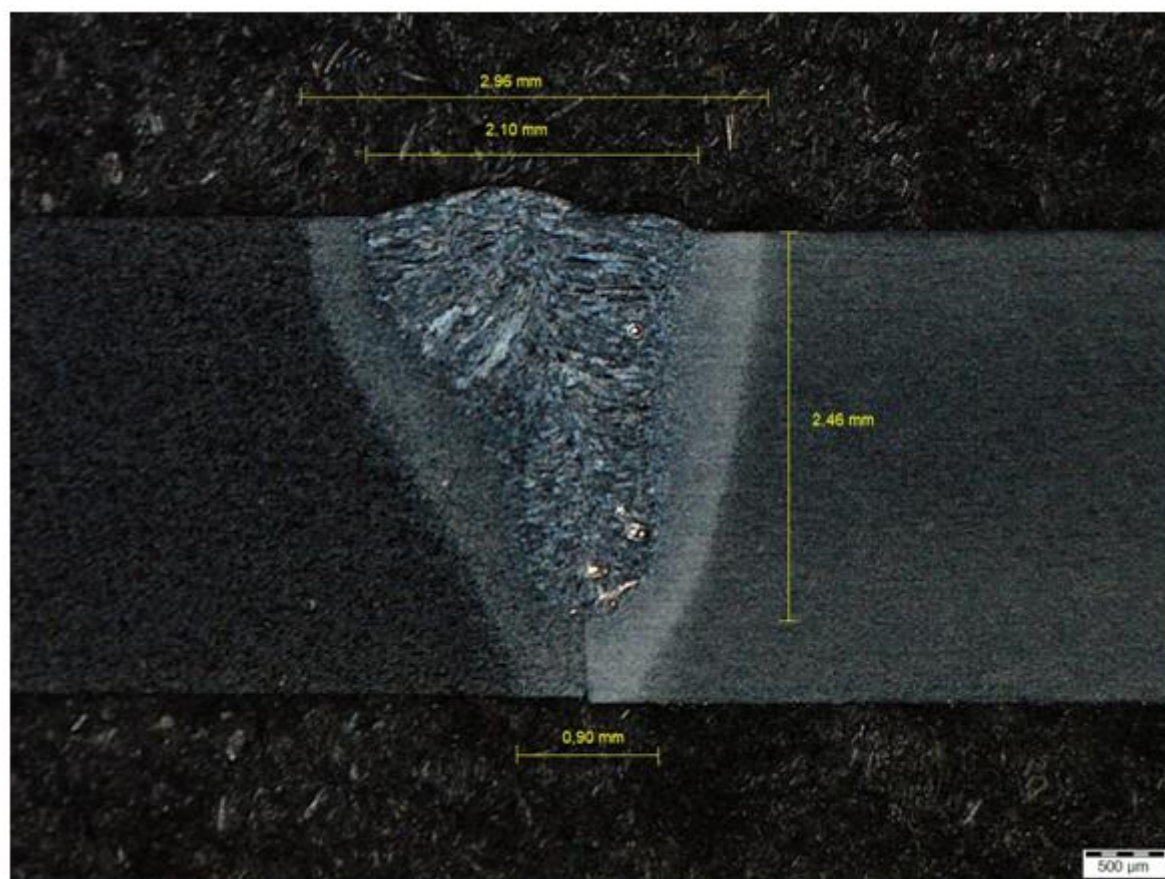


Makrostruktura vzorku č. 6A

Příloha 2

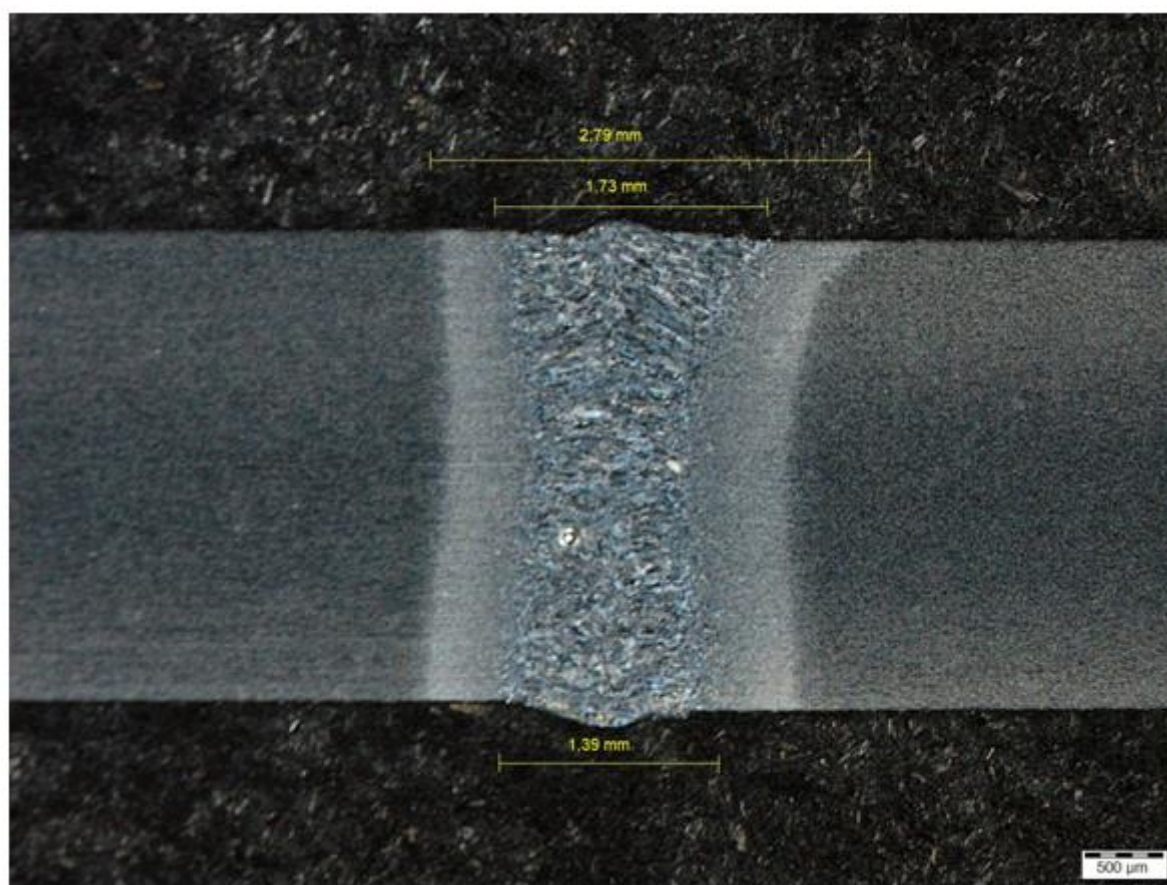


Makrostruktura vzorku č. 7



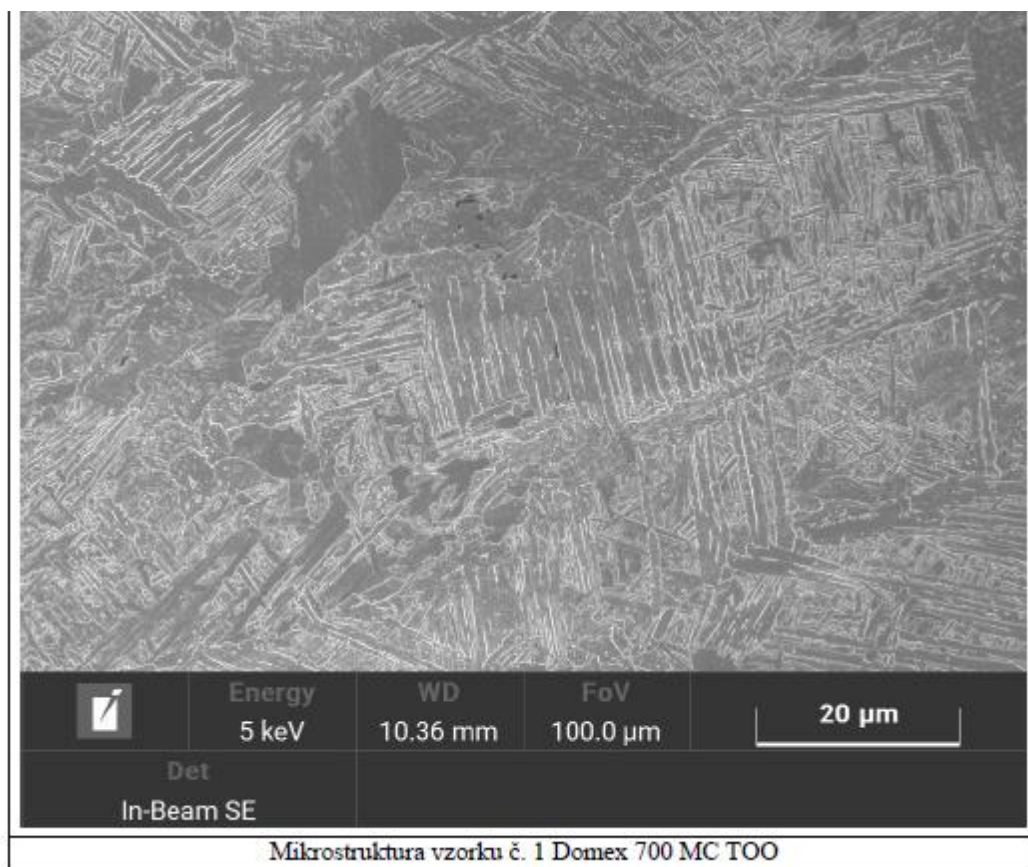
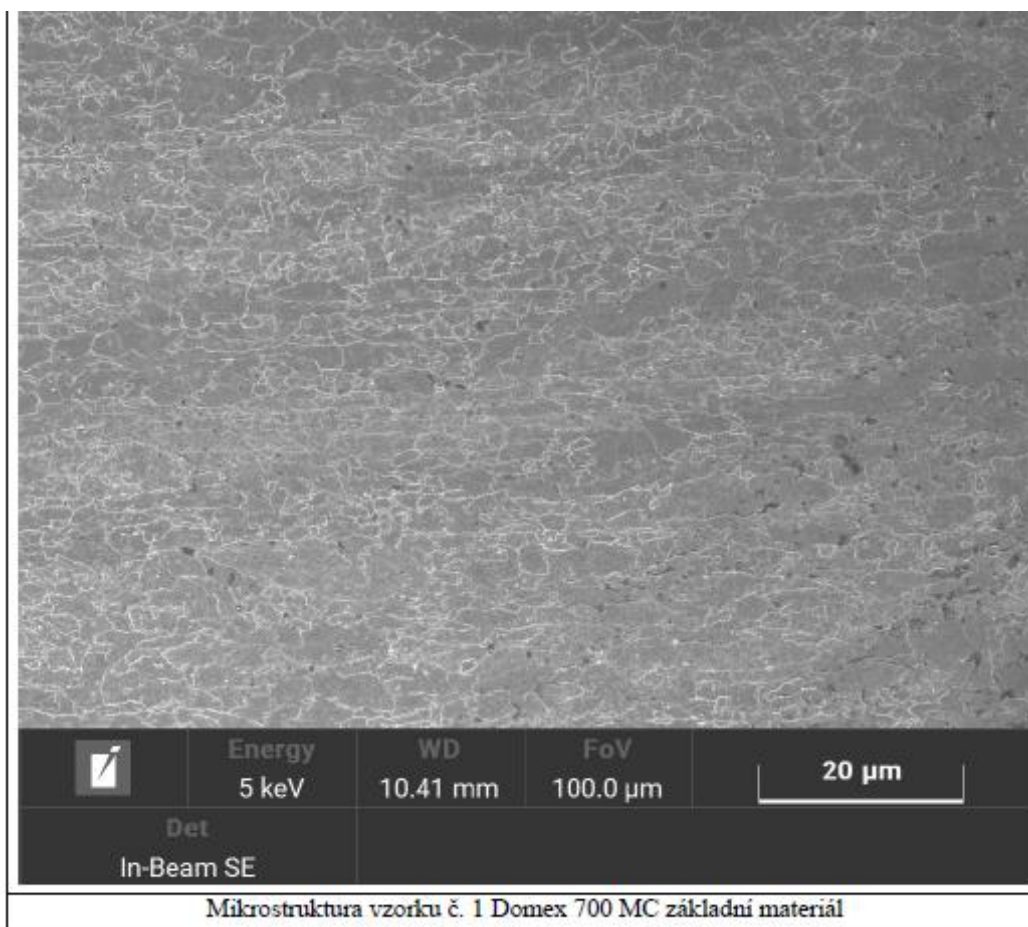
Makrostruktura vzorku č. 7A

Příloha 2

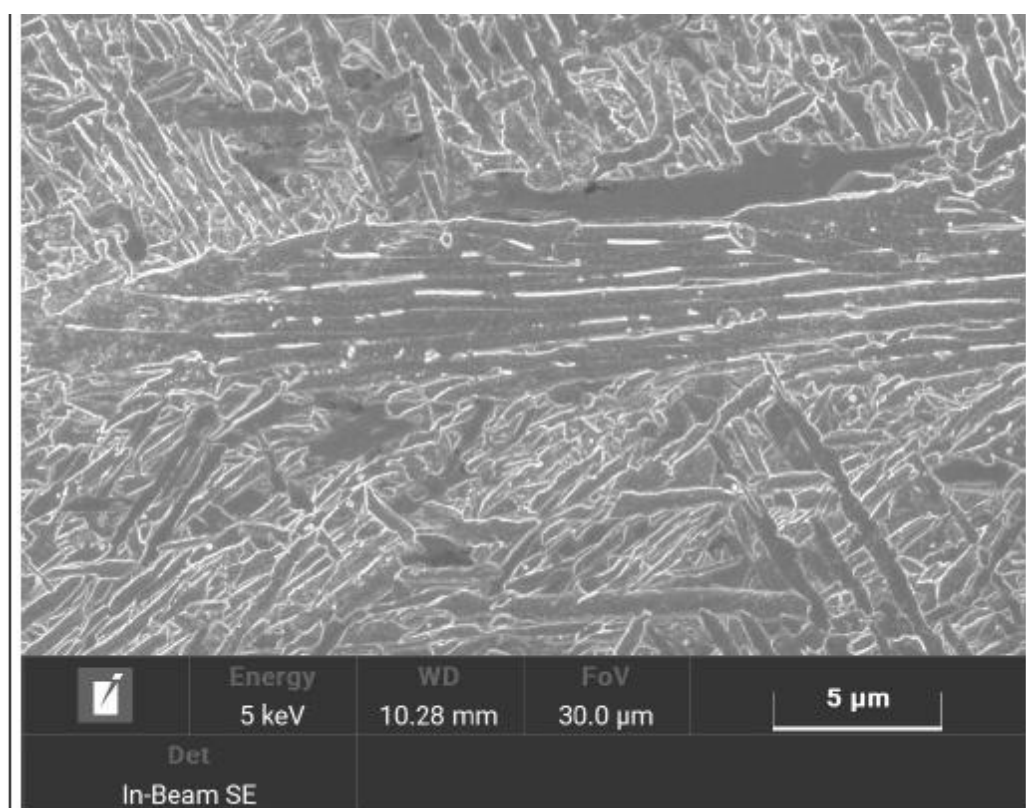


Makrostruktura vzorku č. 8

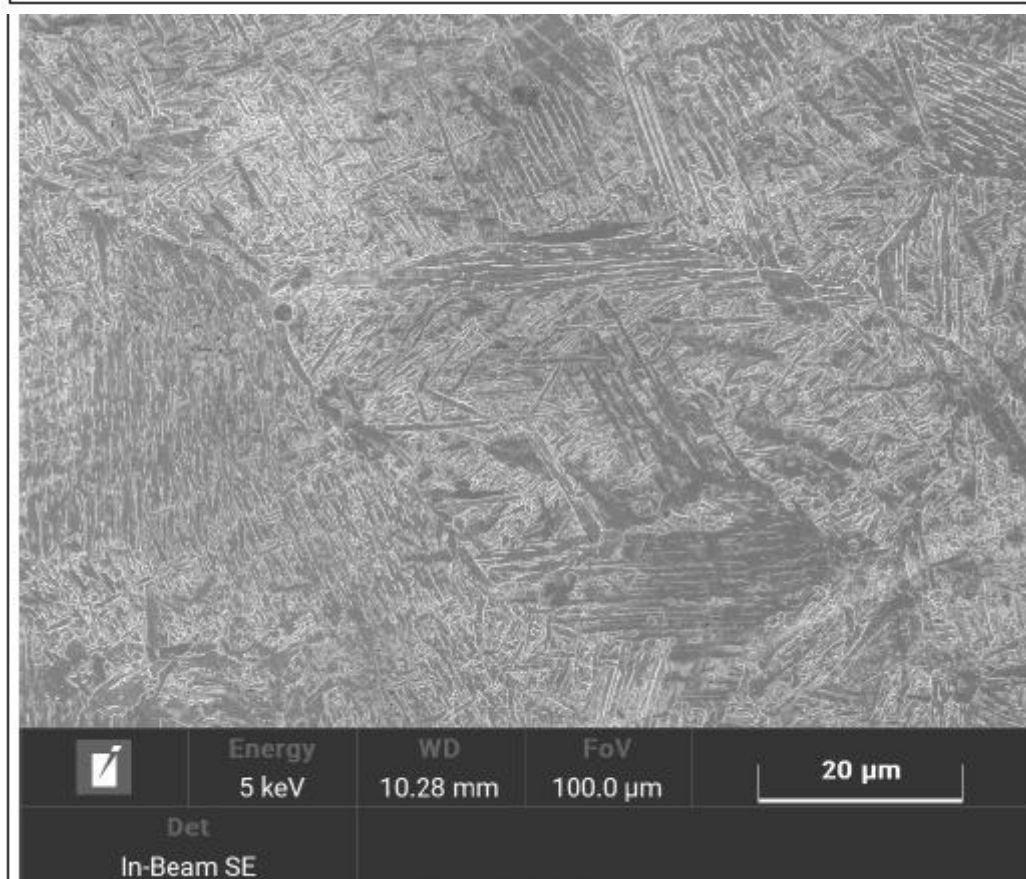
Příloha 3



Příloha 3

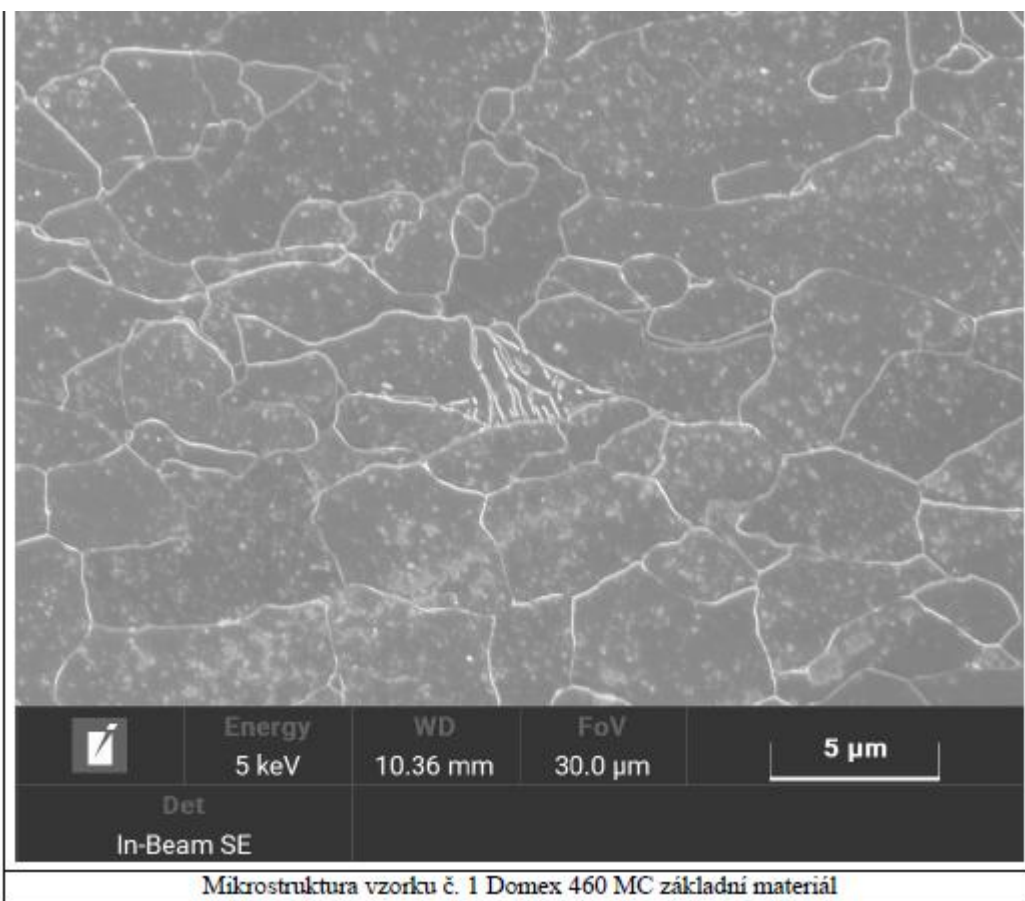
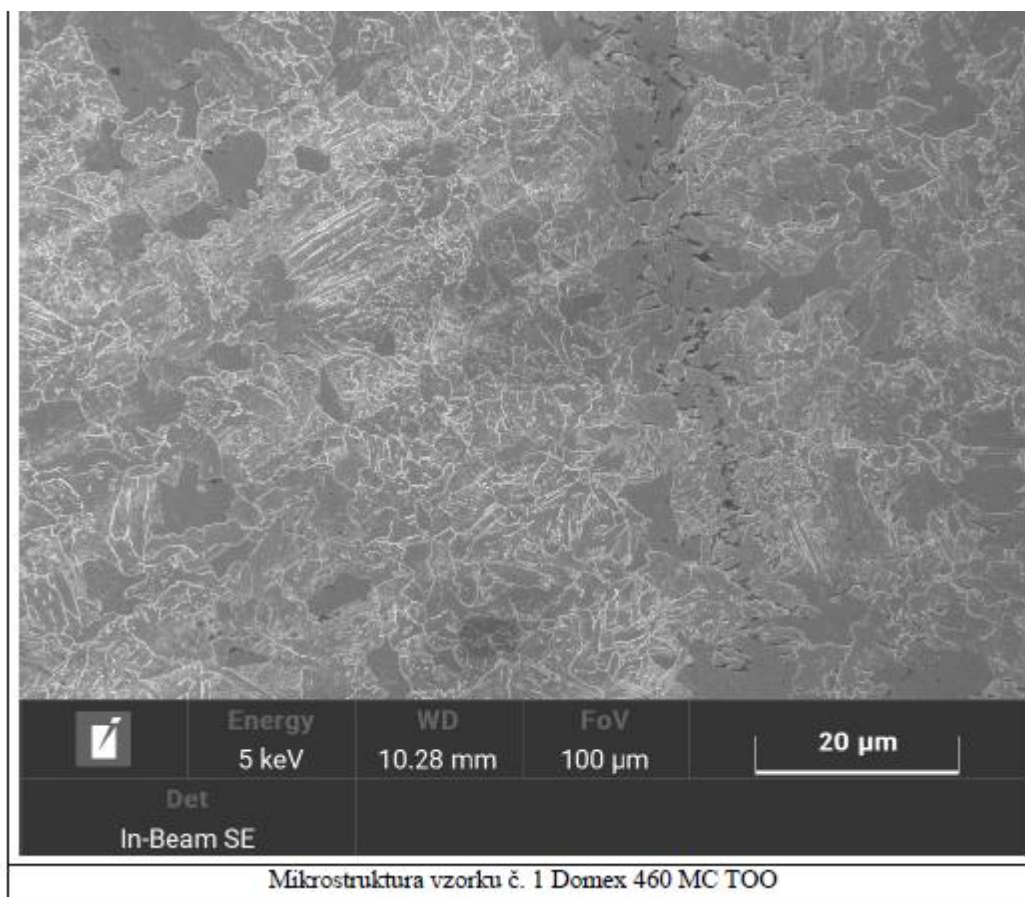


Mikrostruktura vzorku č. 1 Svar

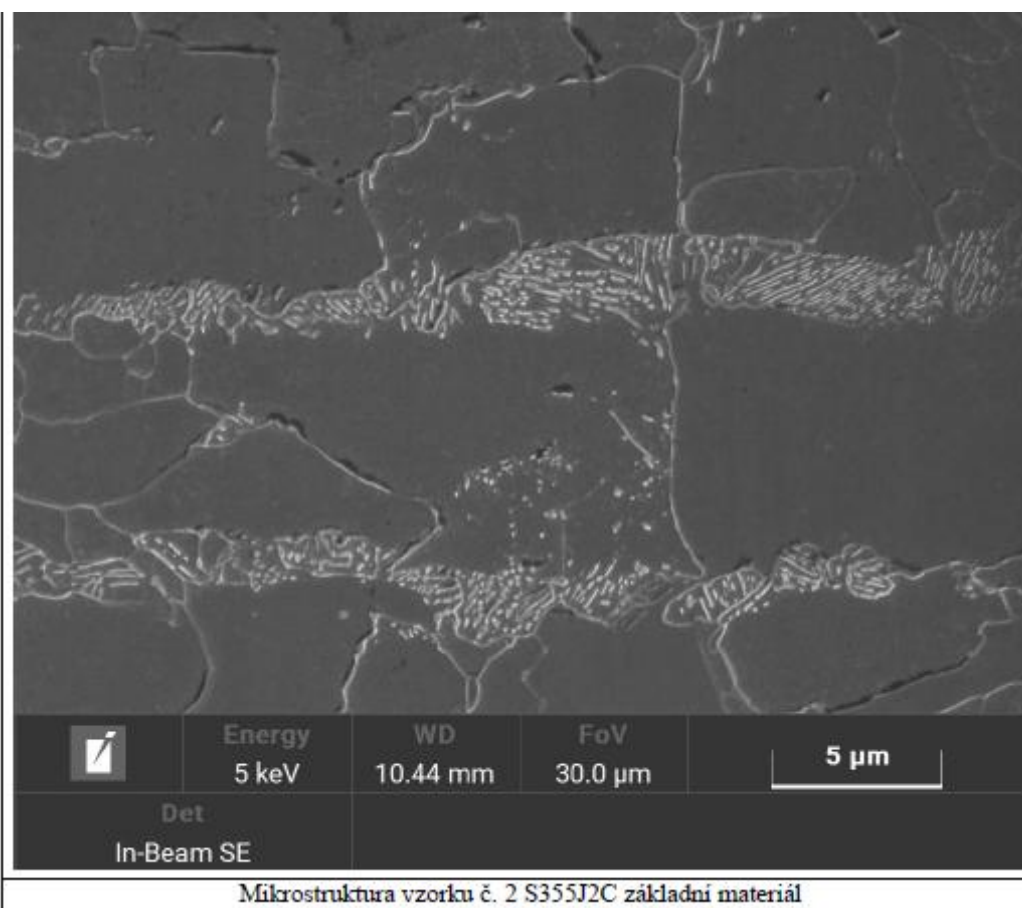
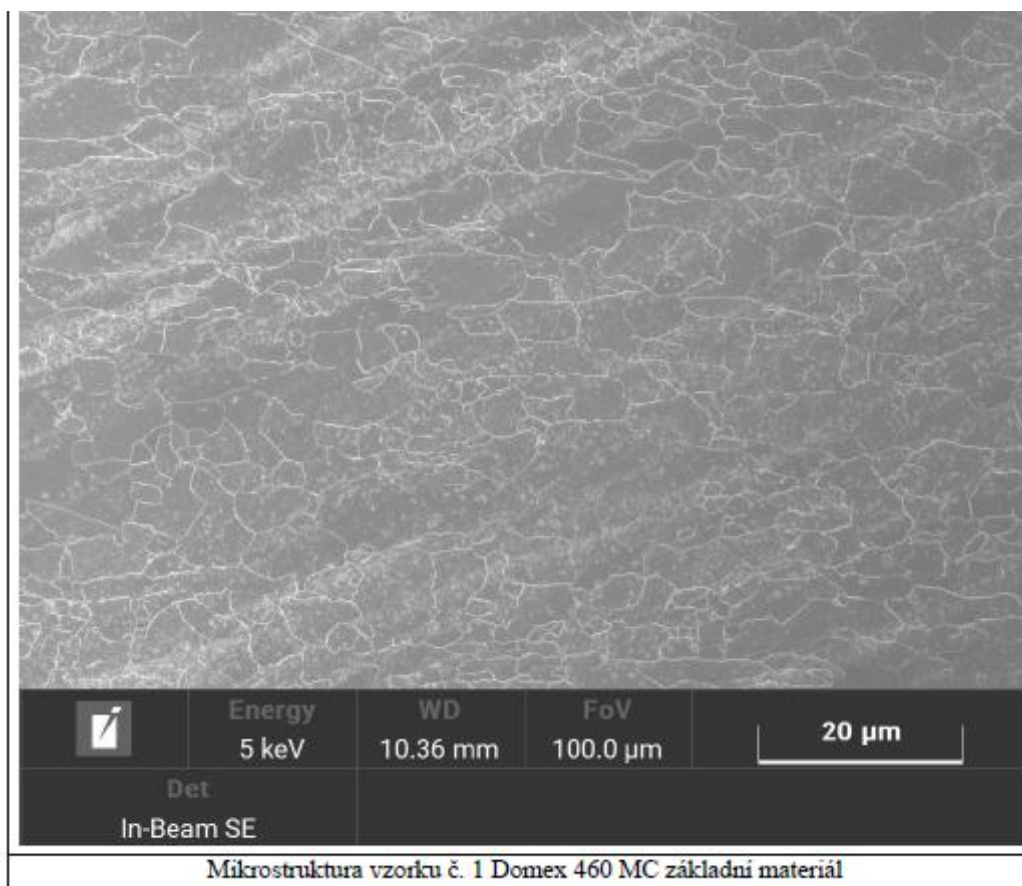


Mikrostruktura vzorku č. 1 Svar

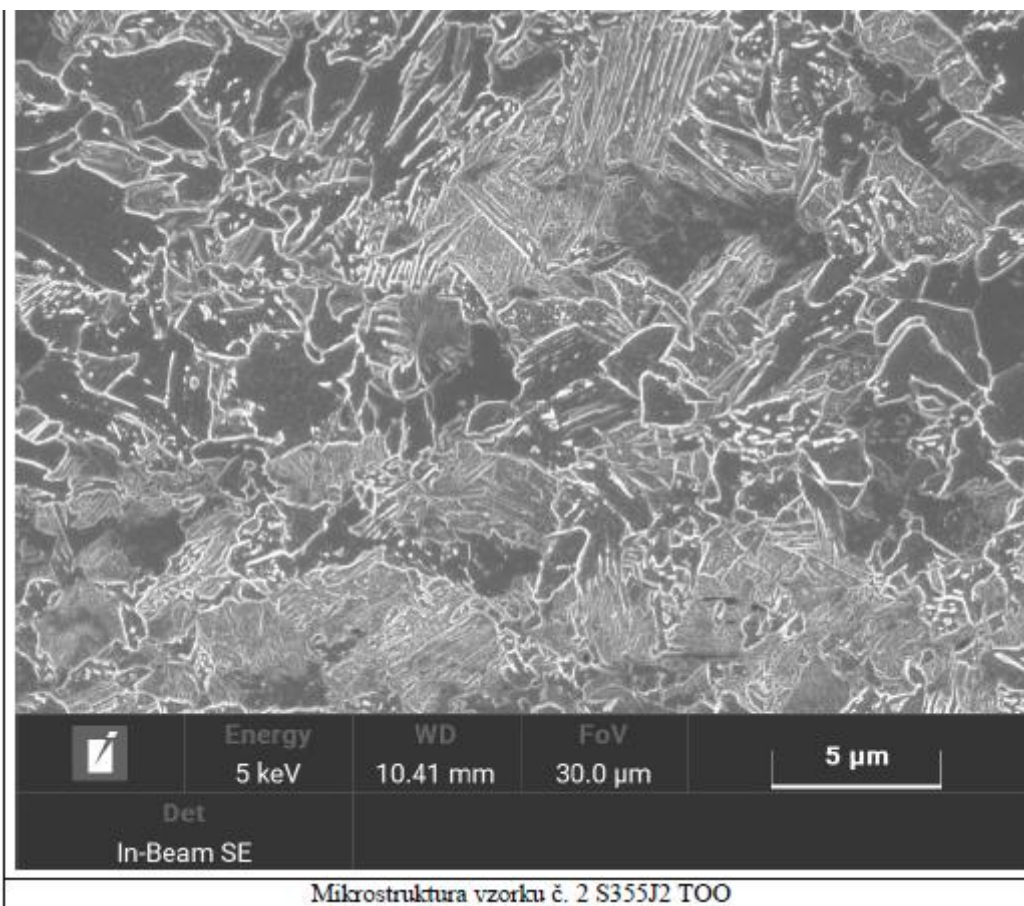
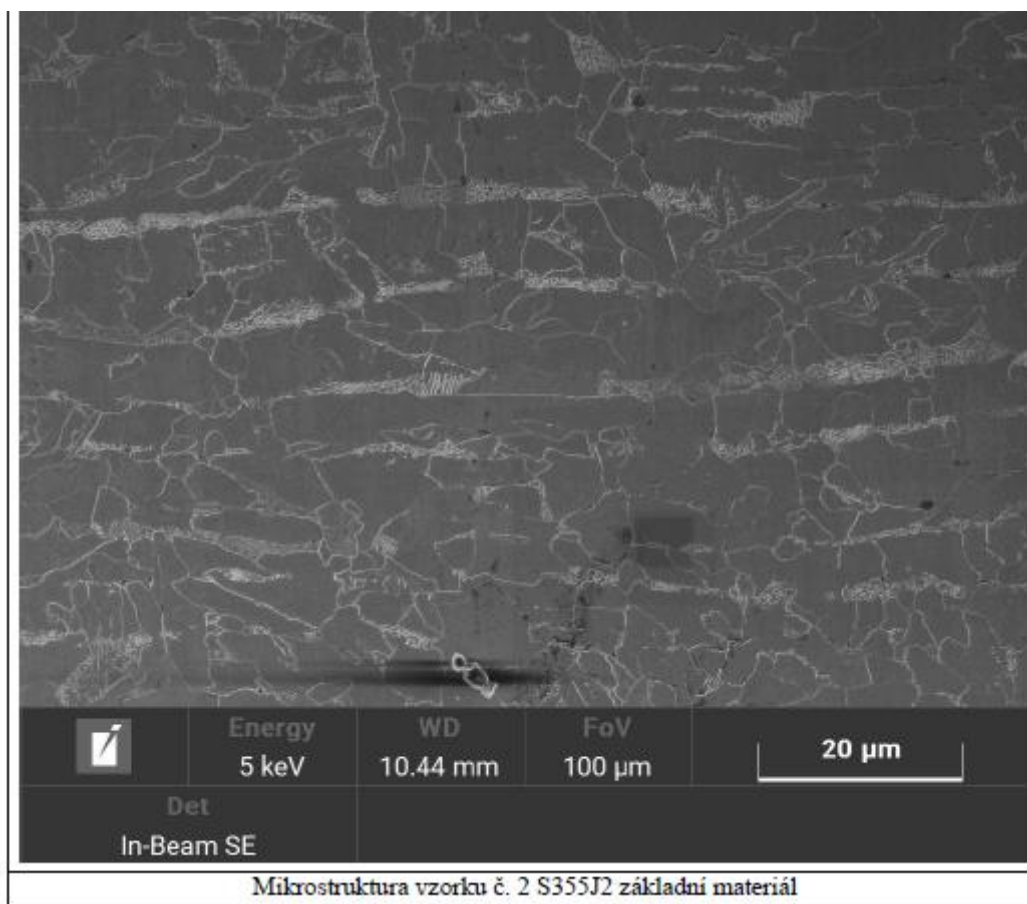
Příloha 3



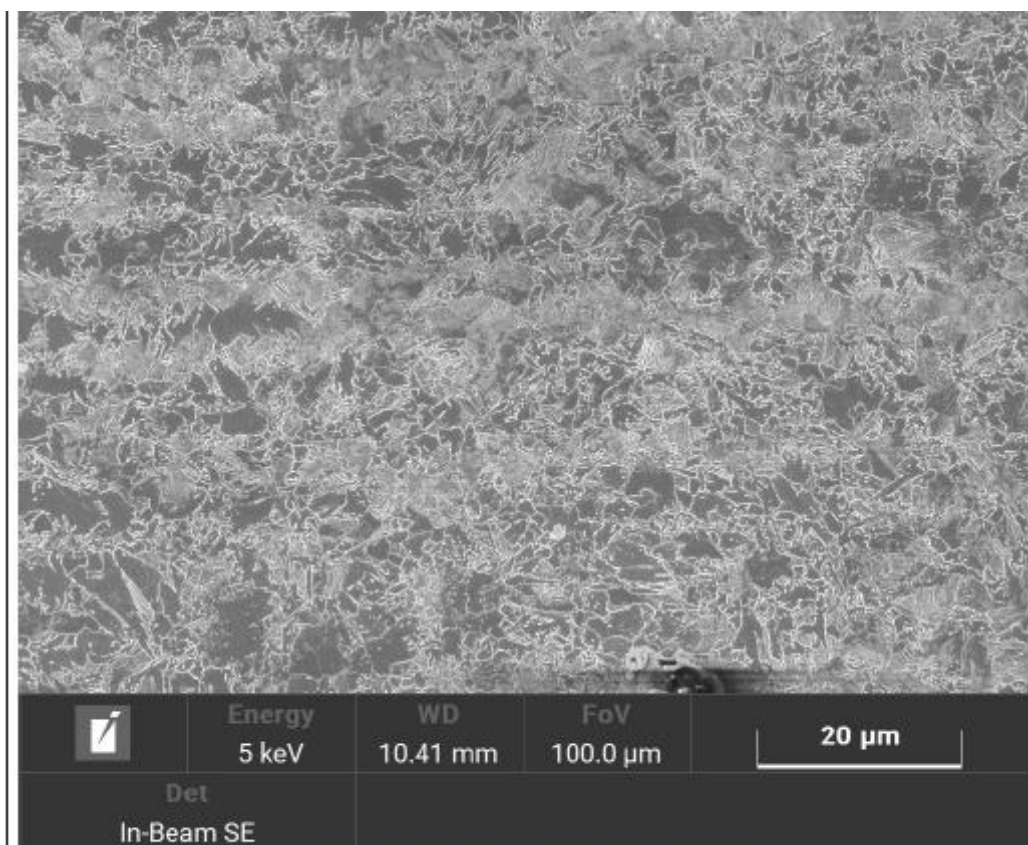
Příloha 3



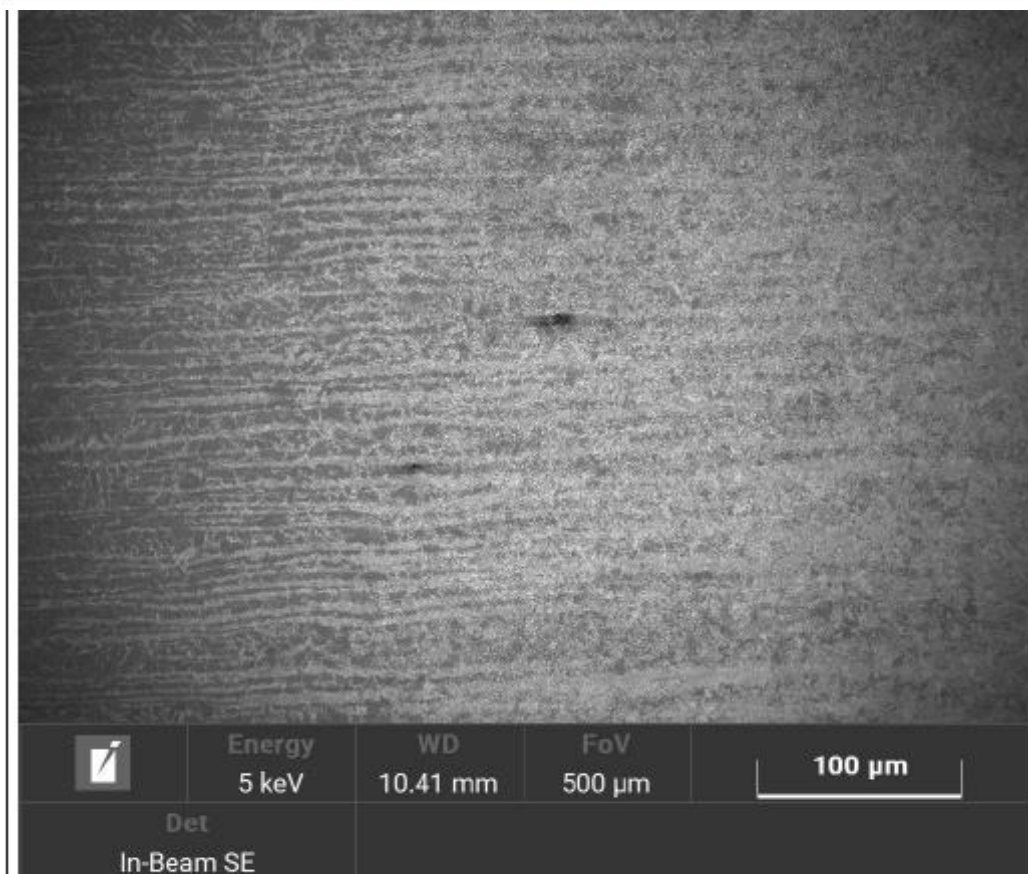
Příloha 3



Příloha 3

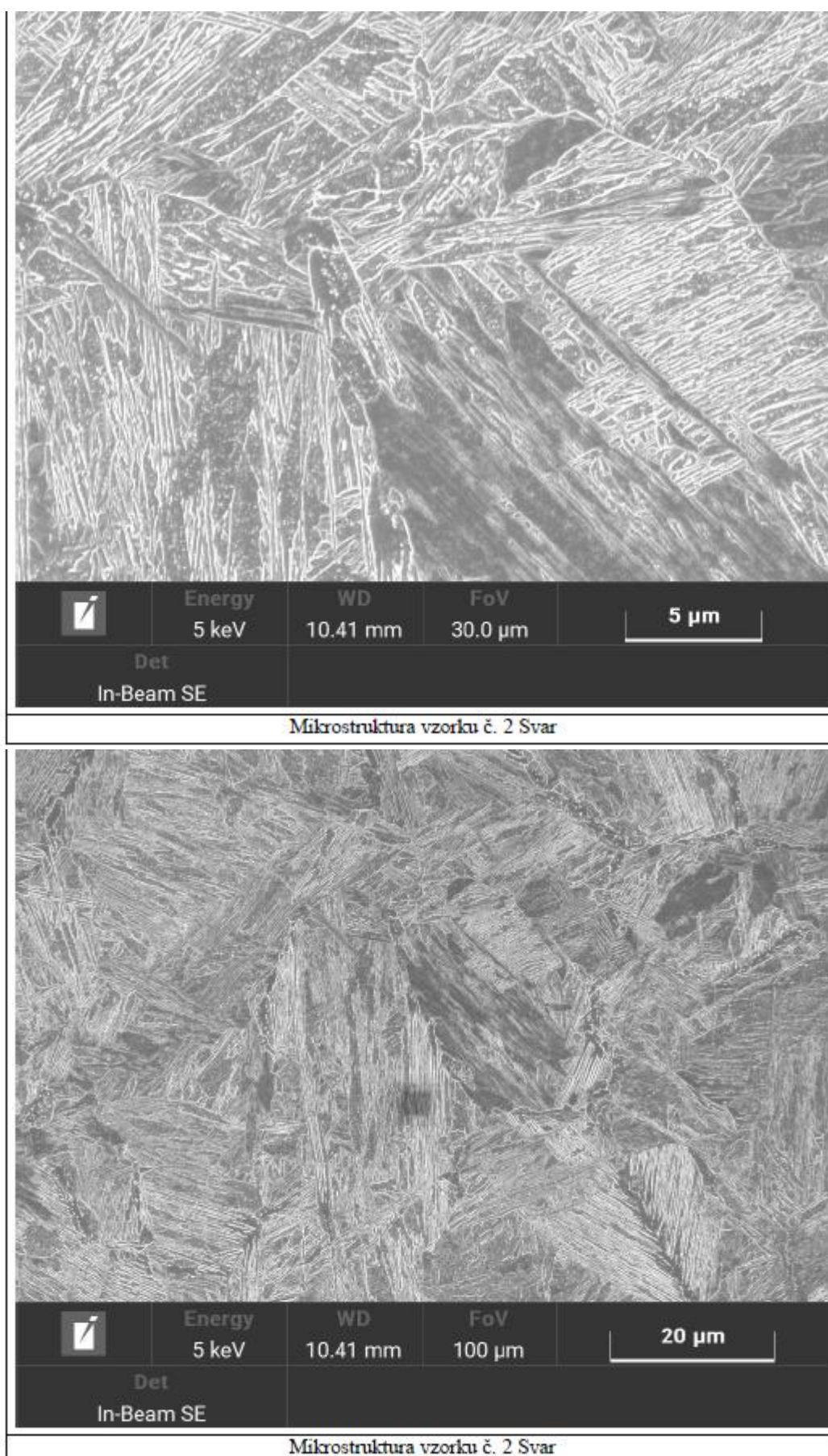


Mikrostruktura vzorku č. 2 S355J2 TOO

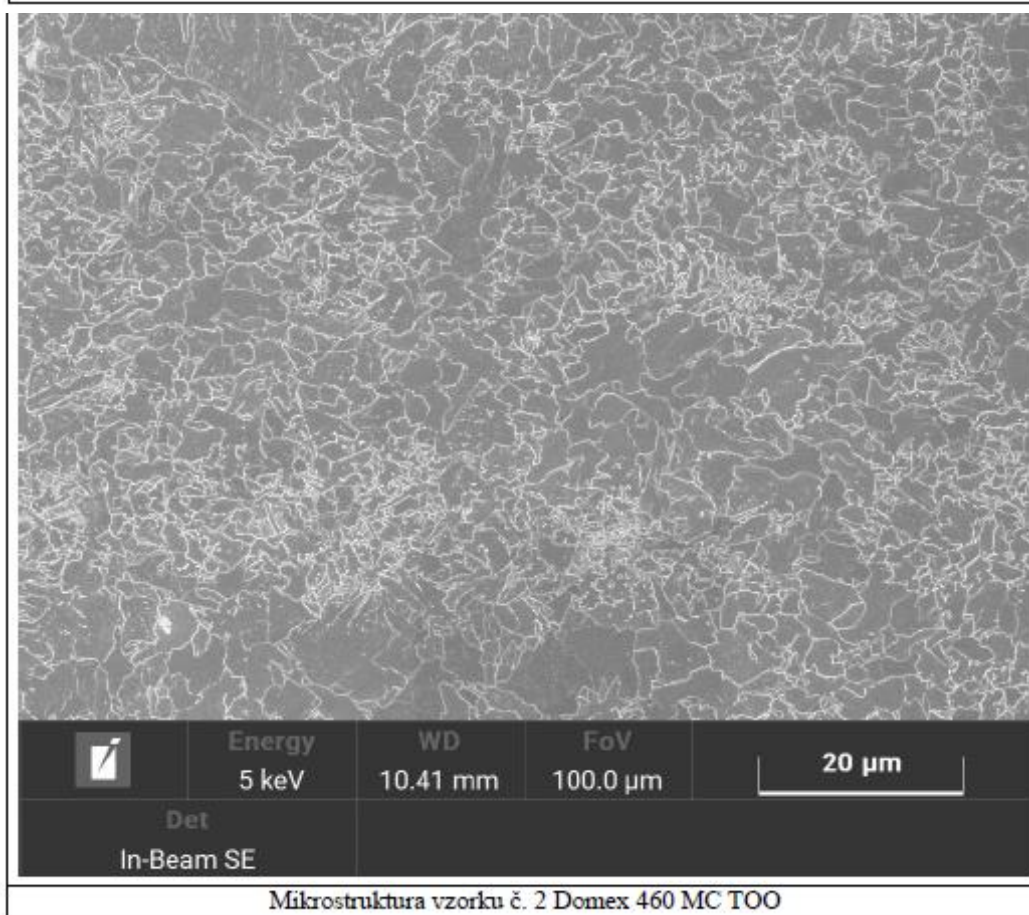
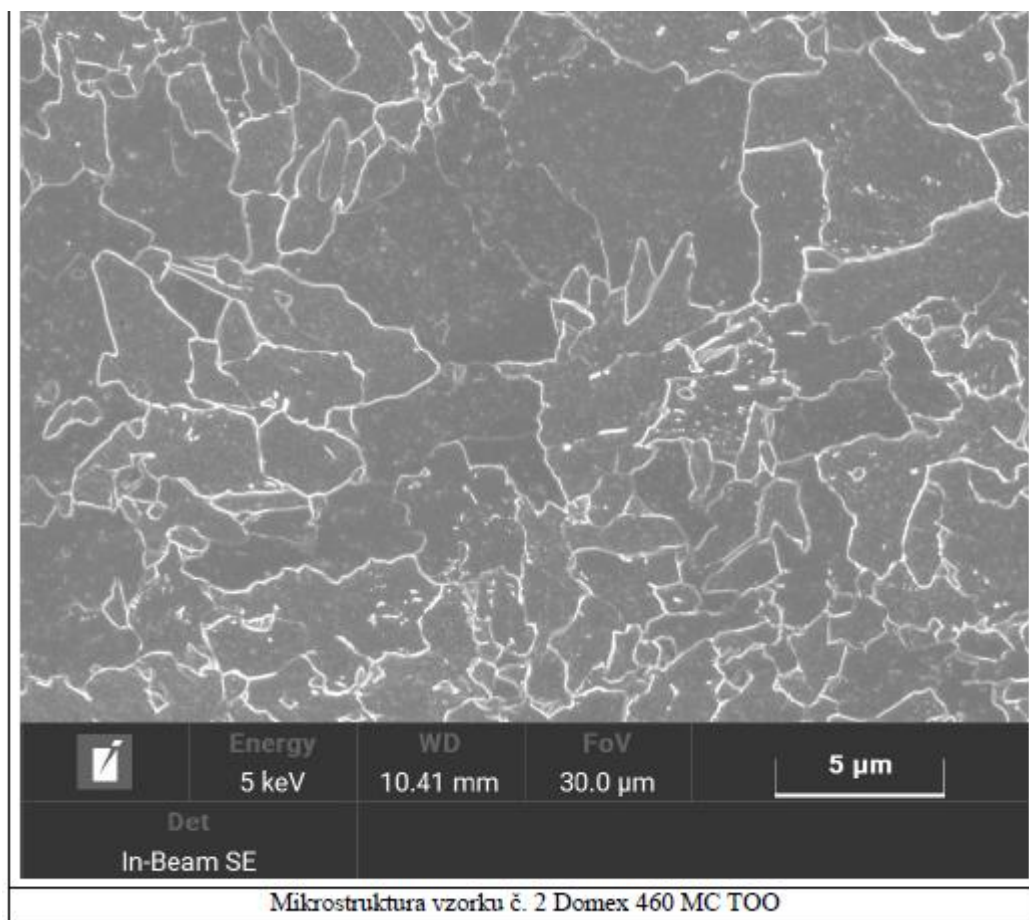


Mikrostruktura vzorku č. 2 S355J2 TOO

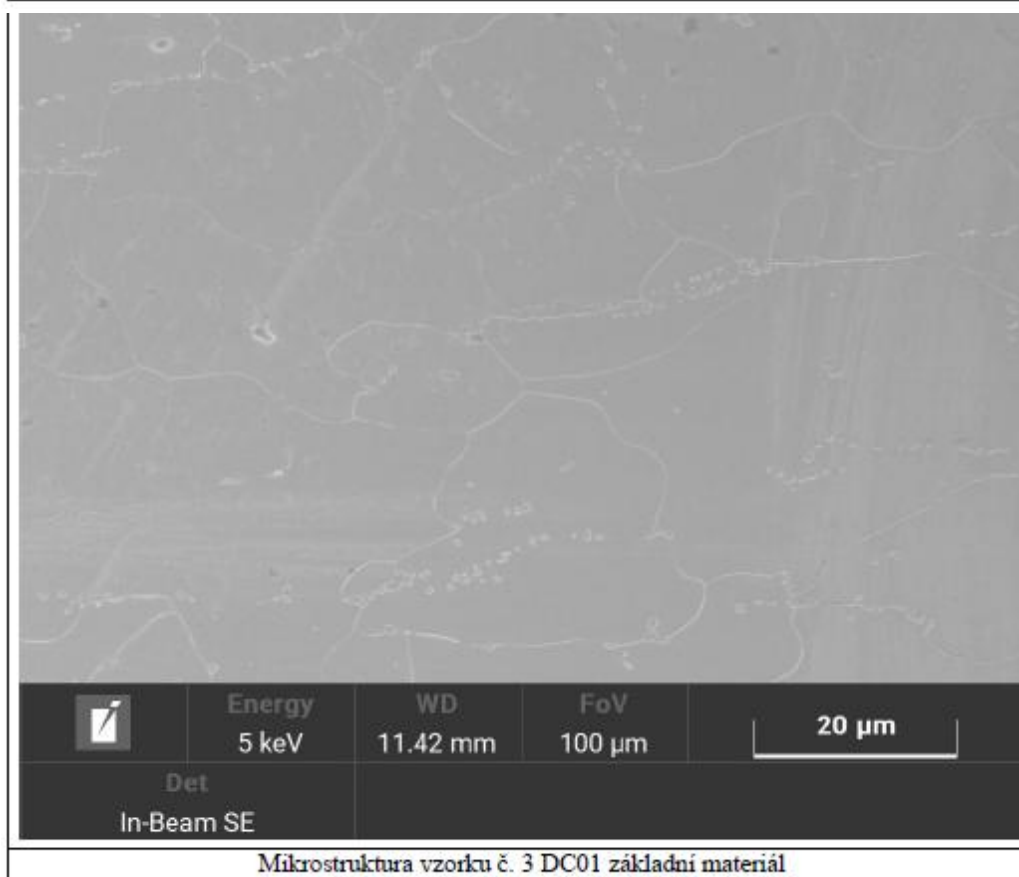
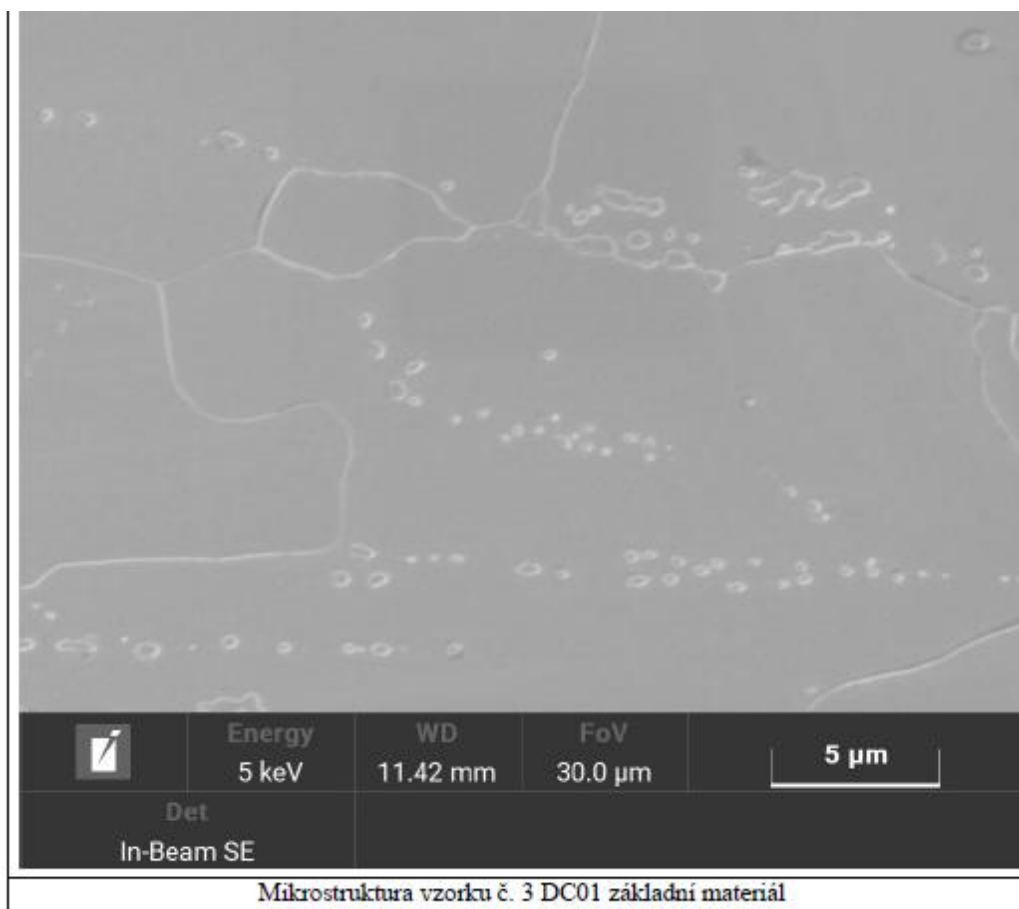
Příloha 3



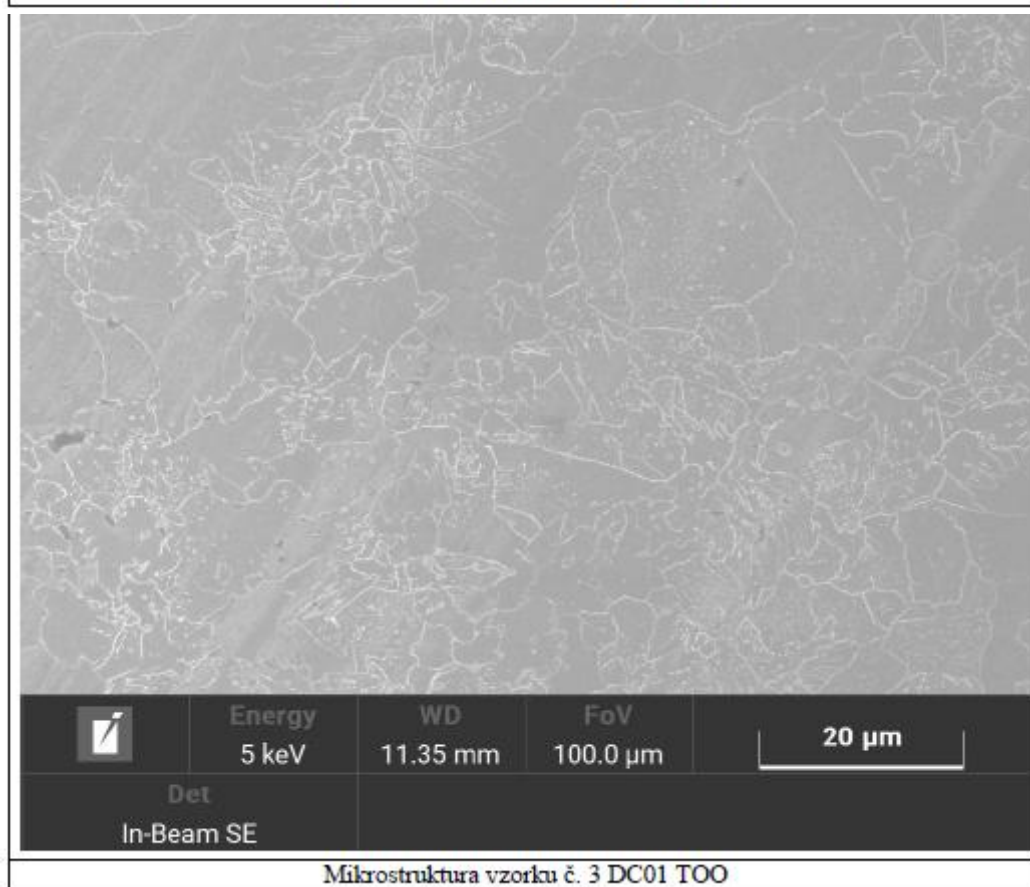
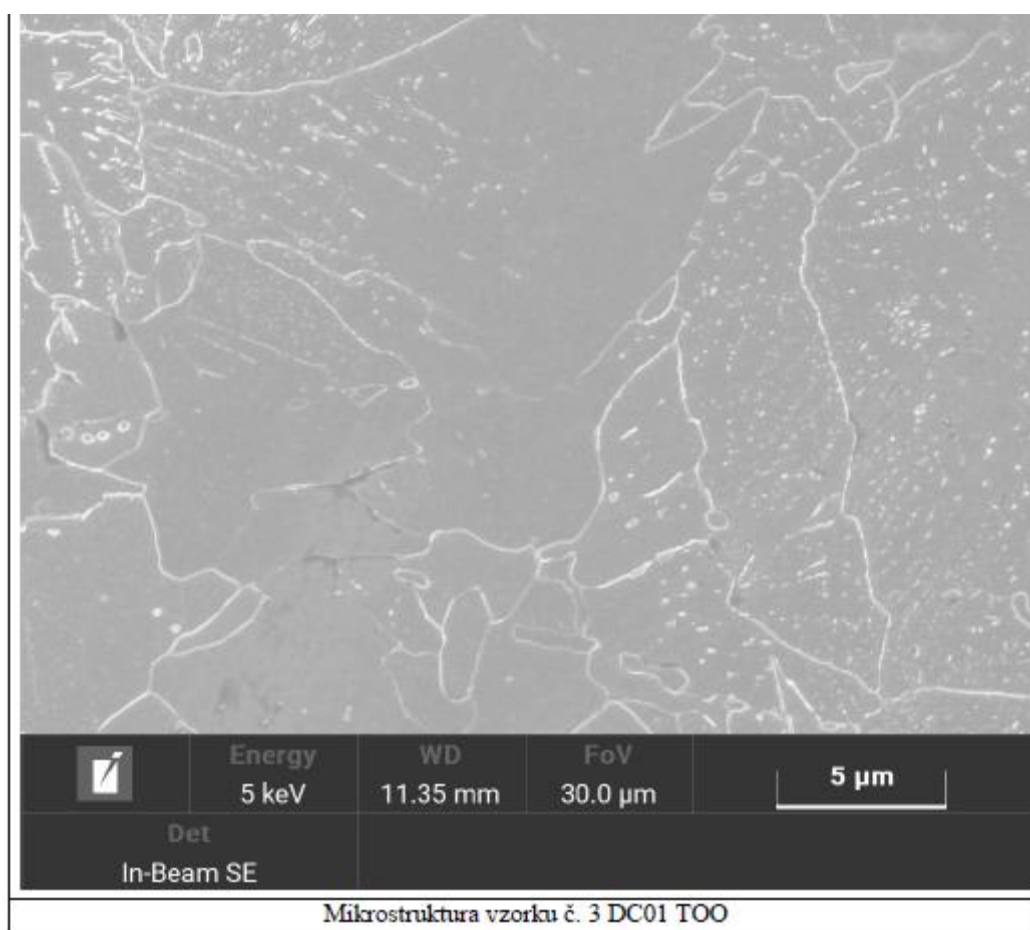
Příloha 3



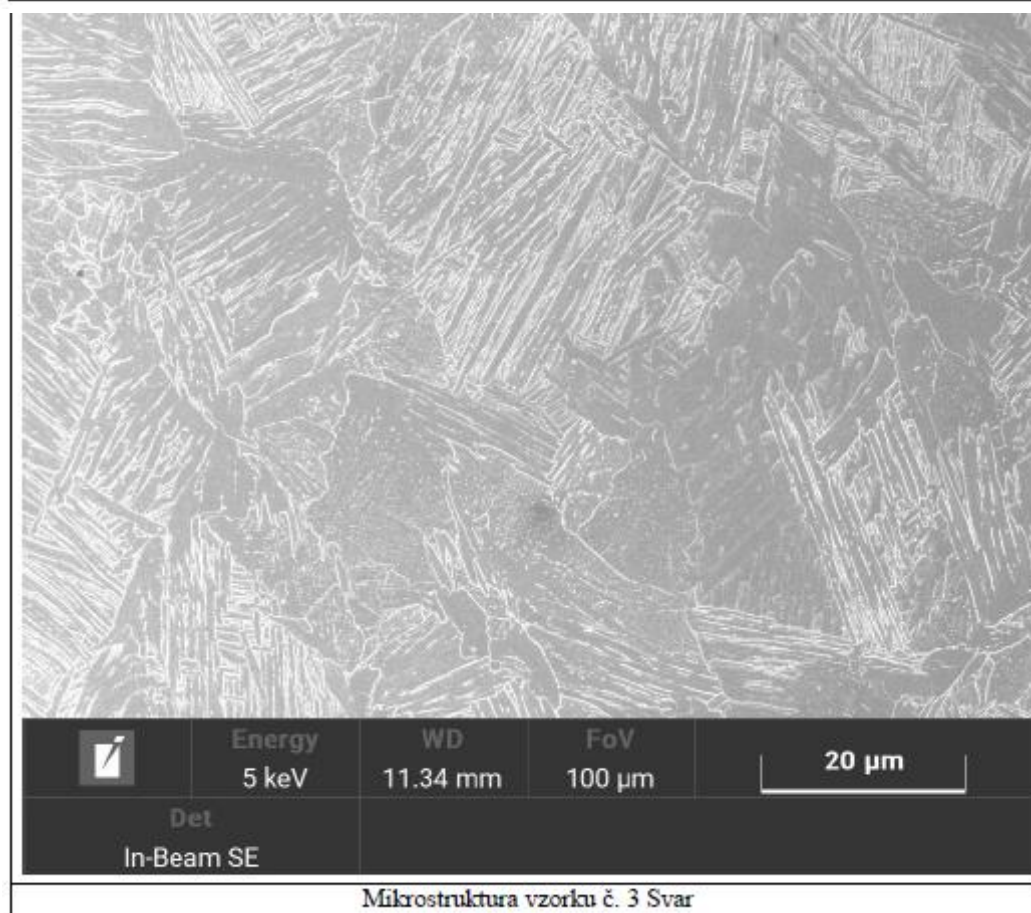
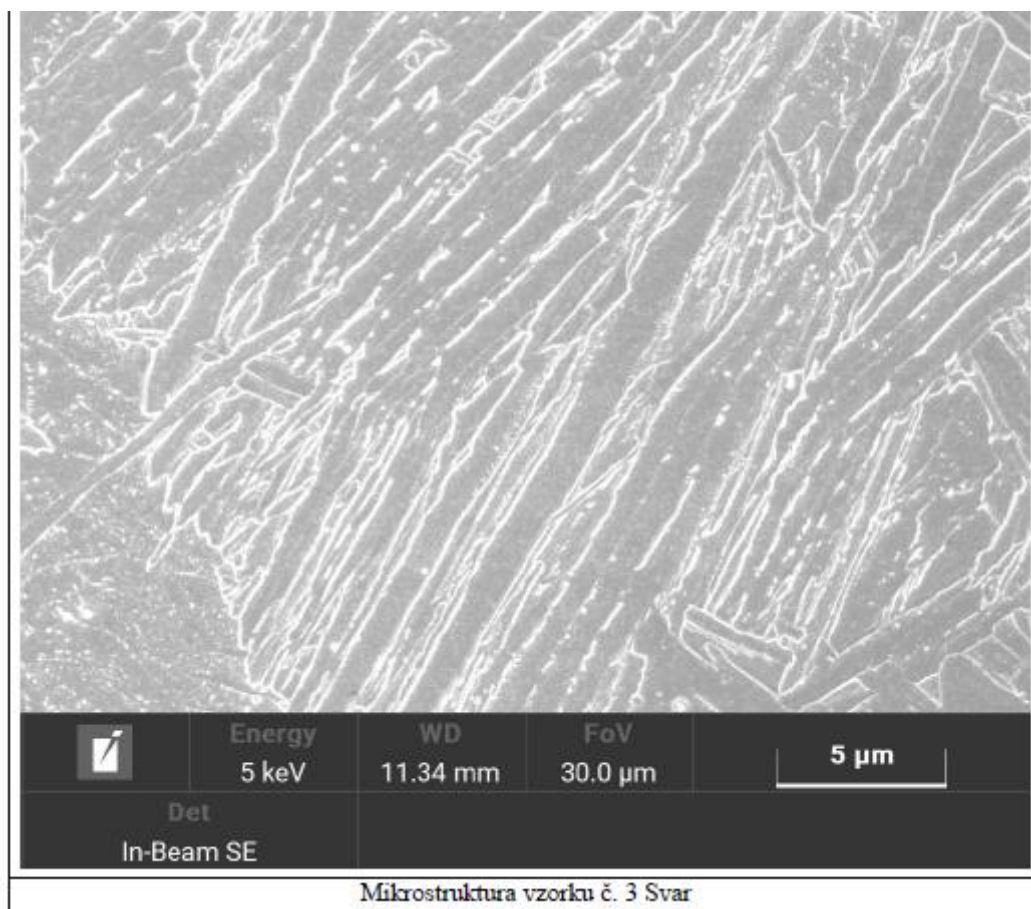
Příloha 3



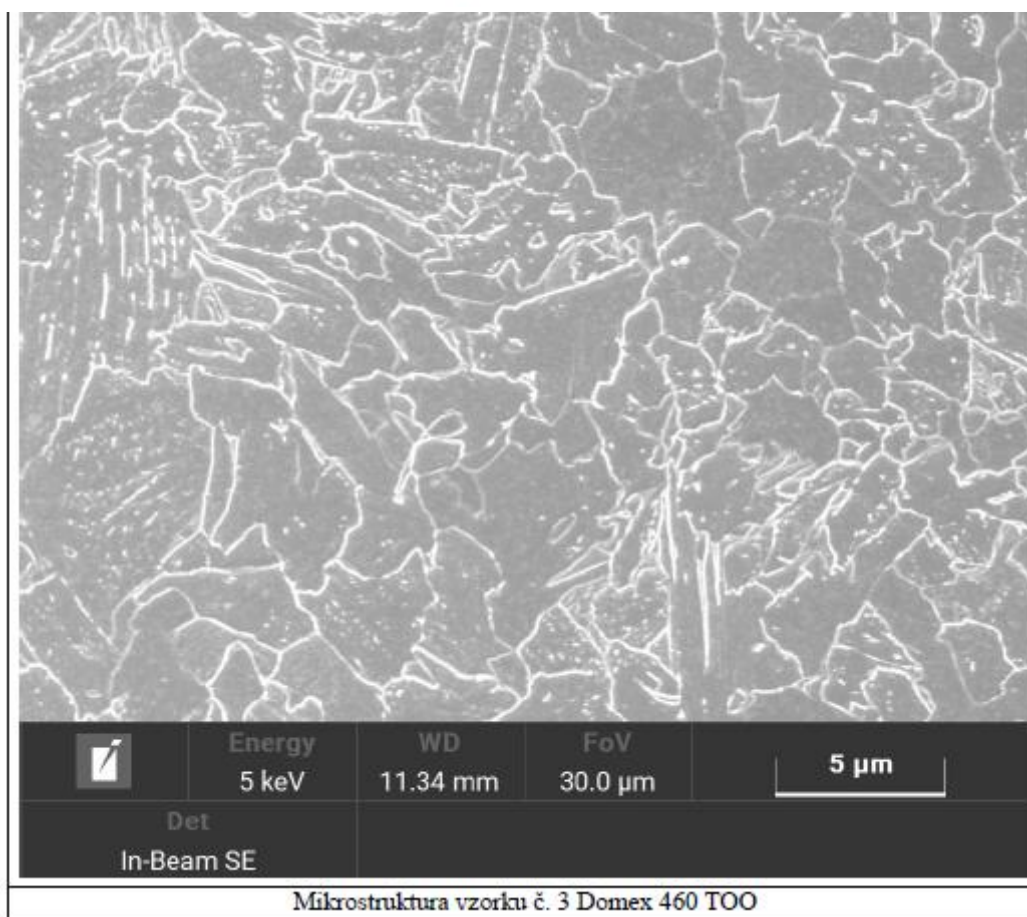
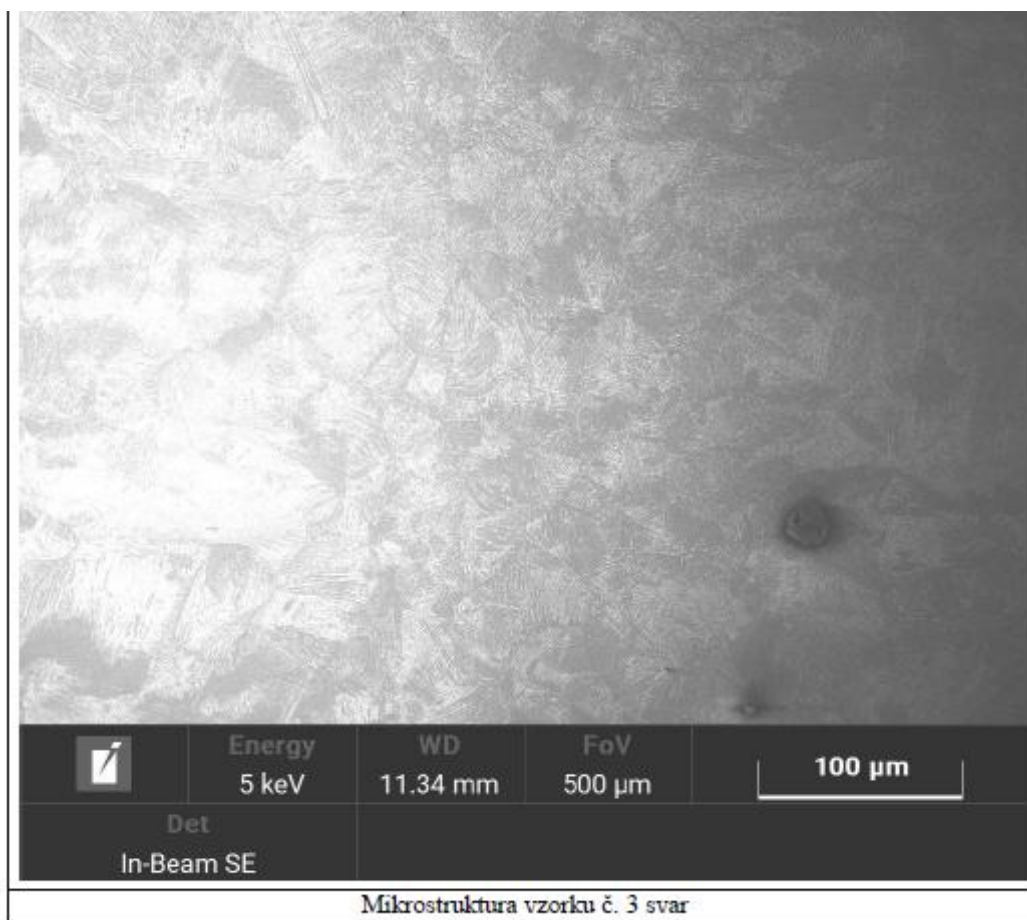
Příloha 3

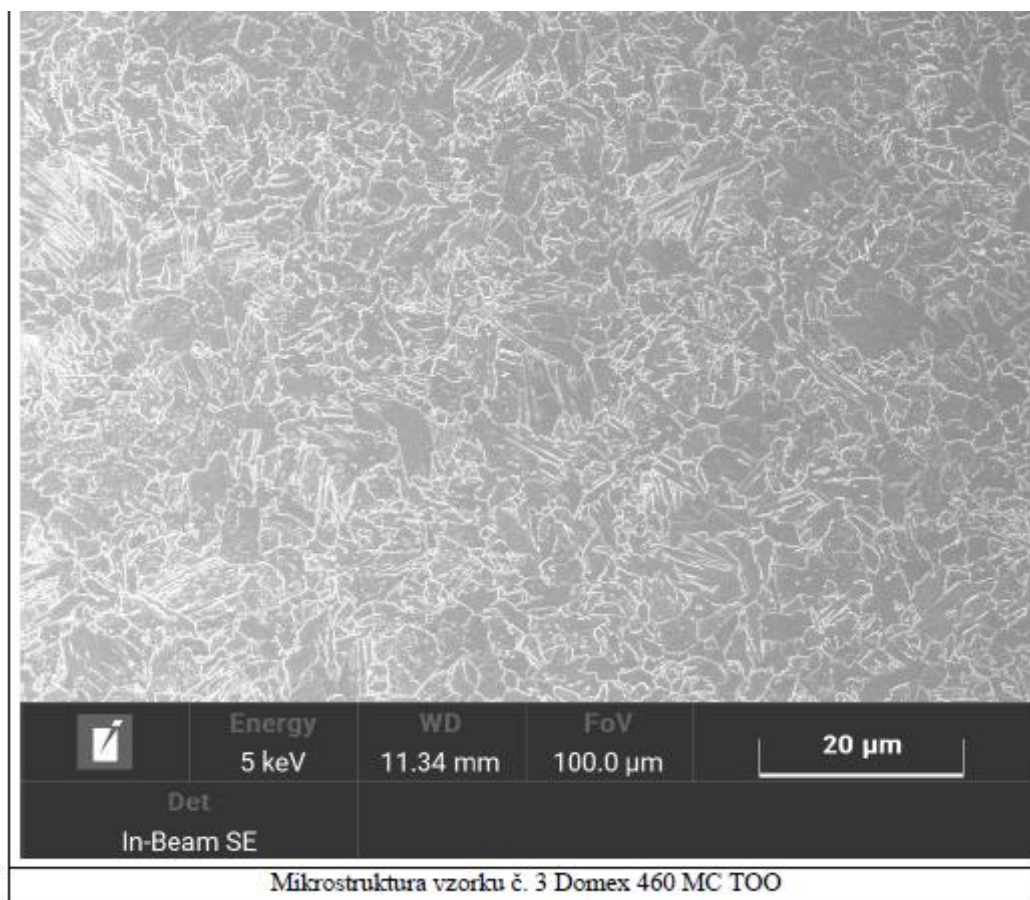


Příloha 3

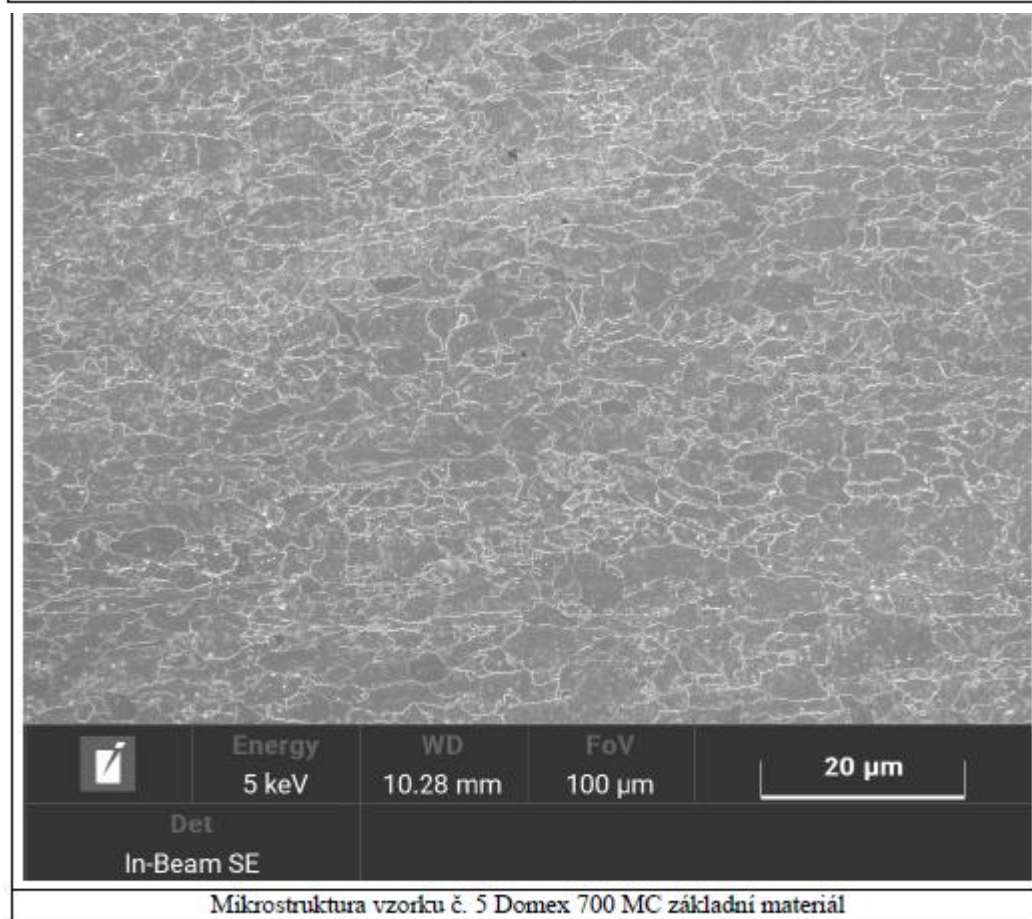
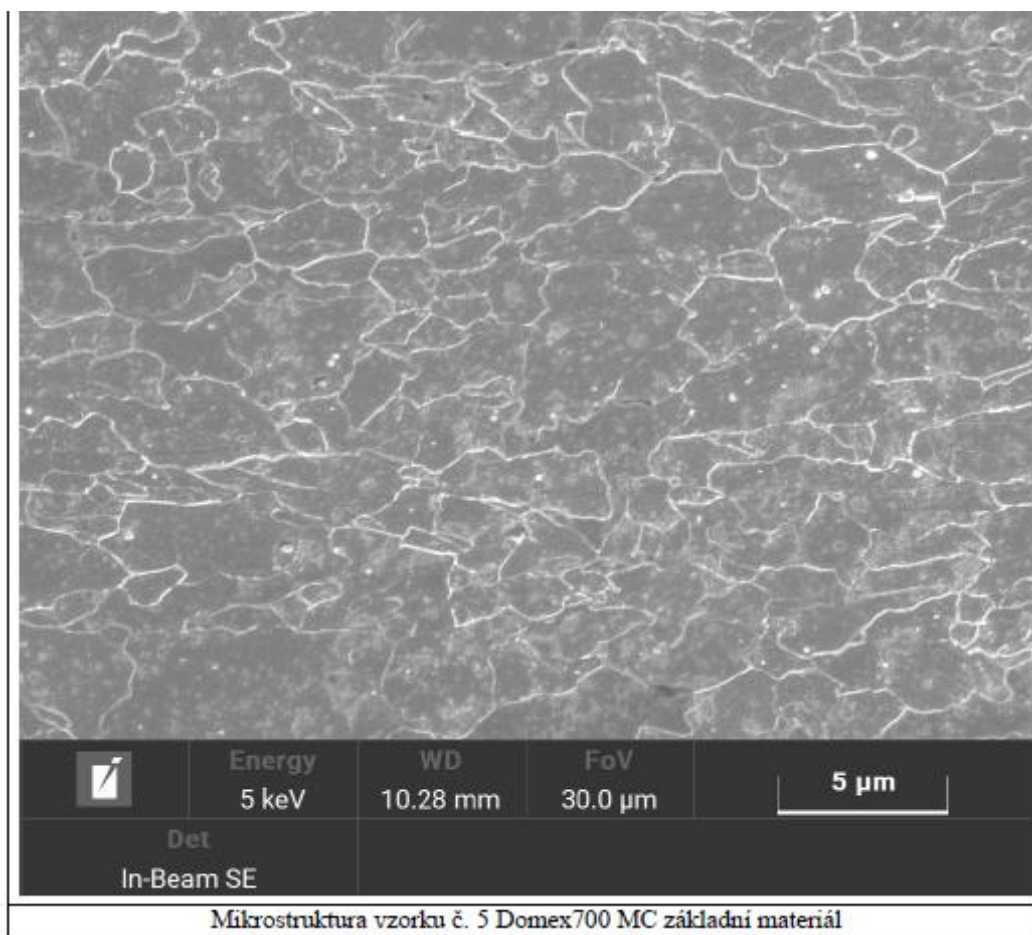


Příloha 3

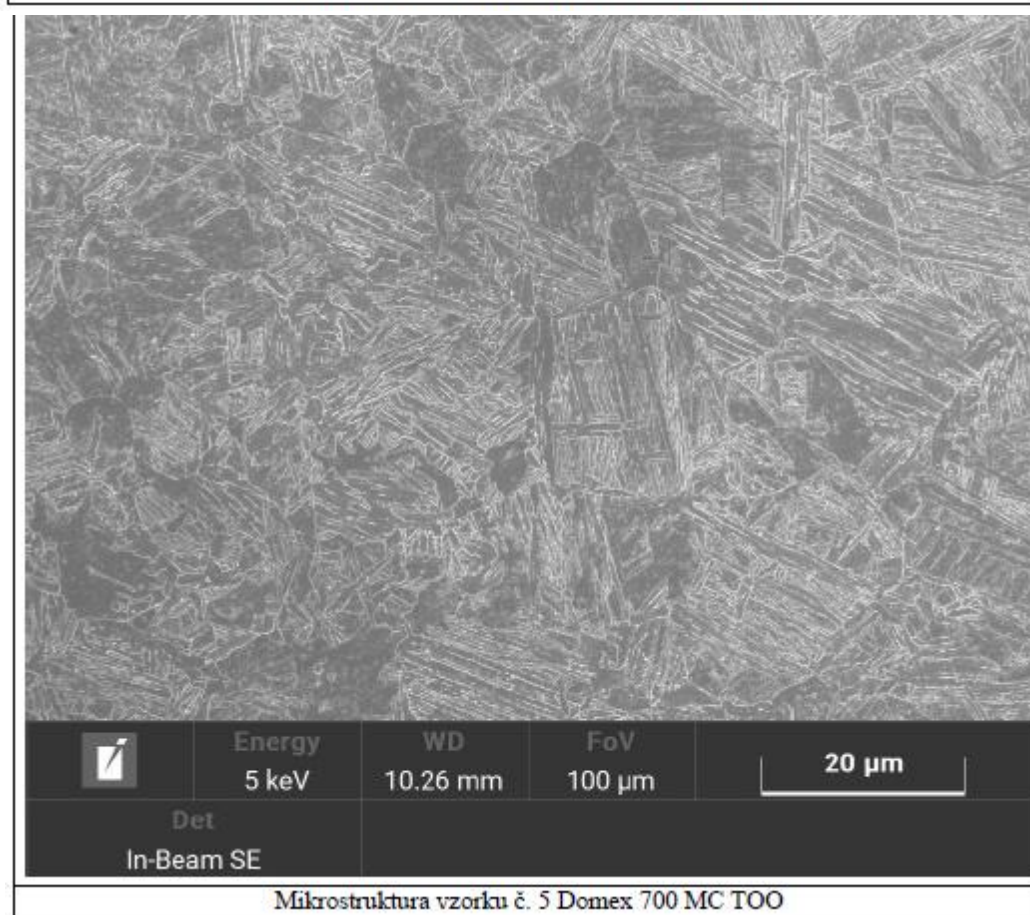
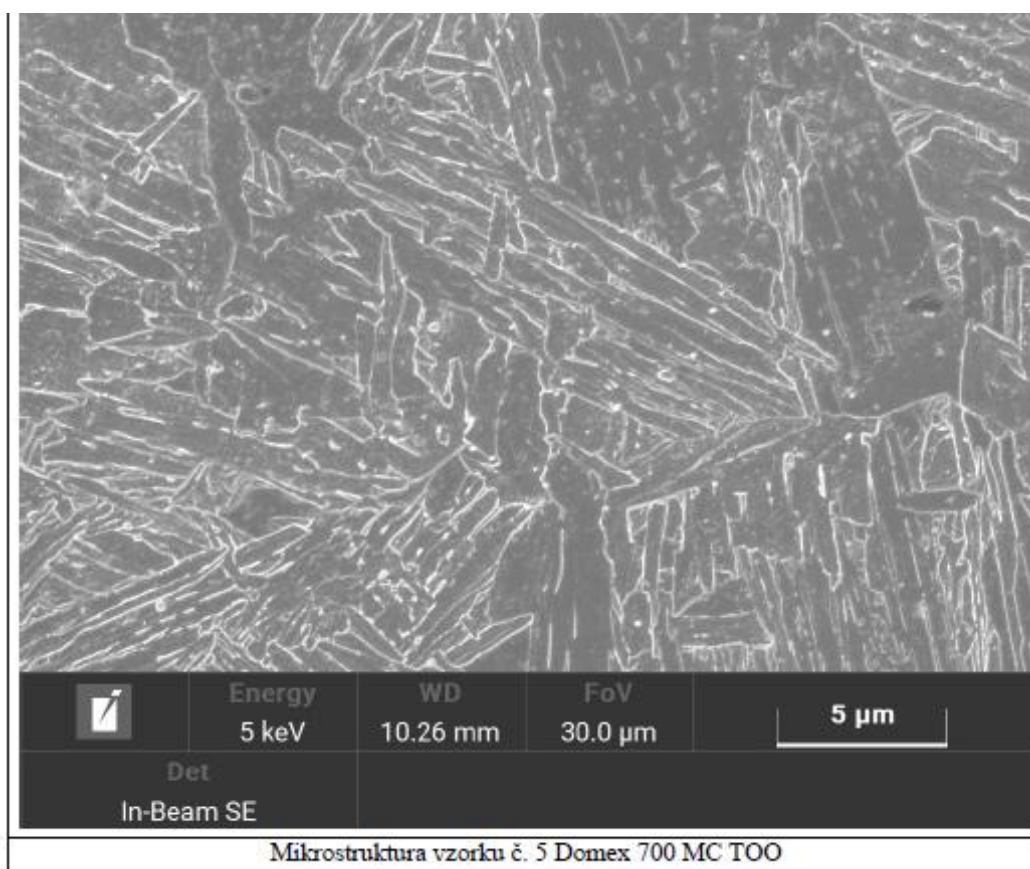


Příloha 3

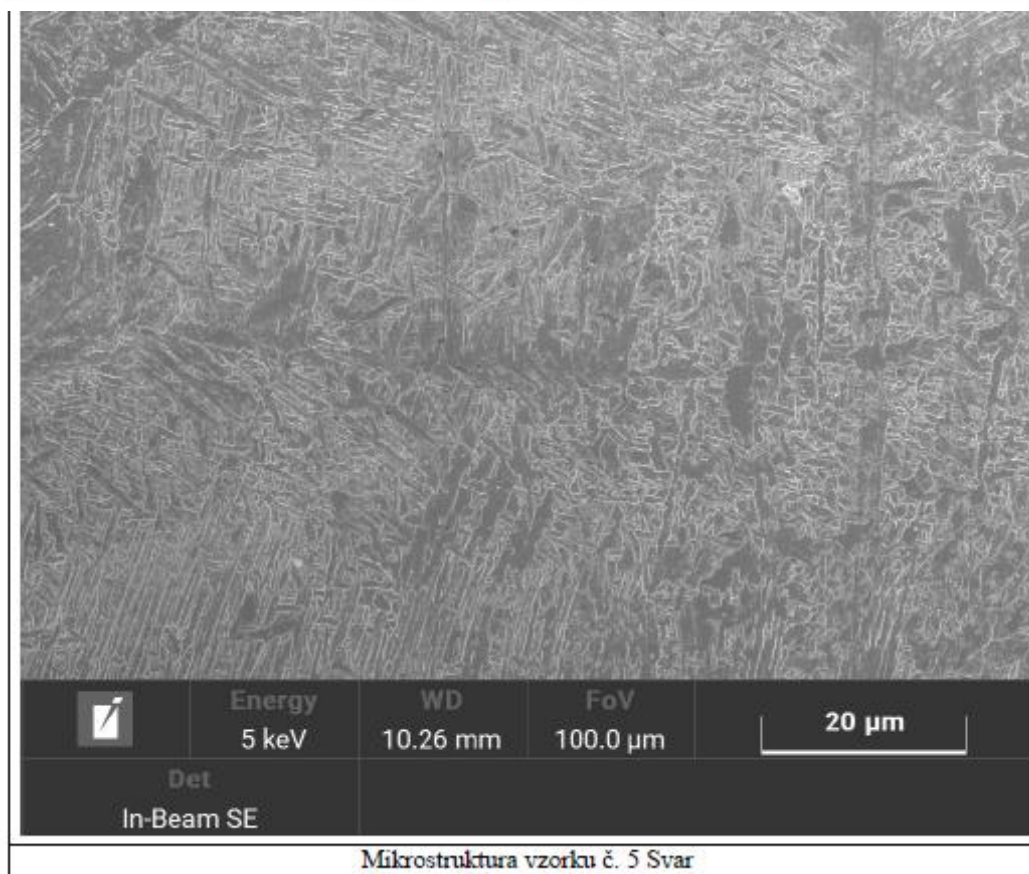
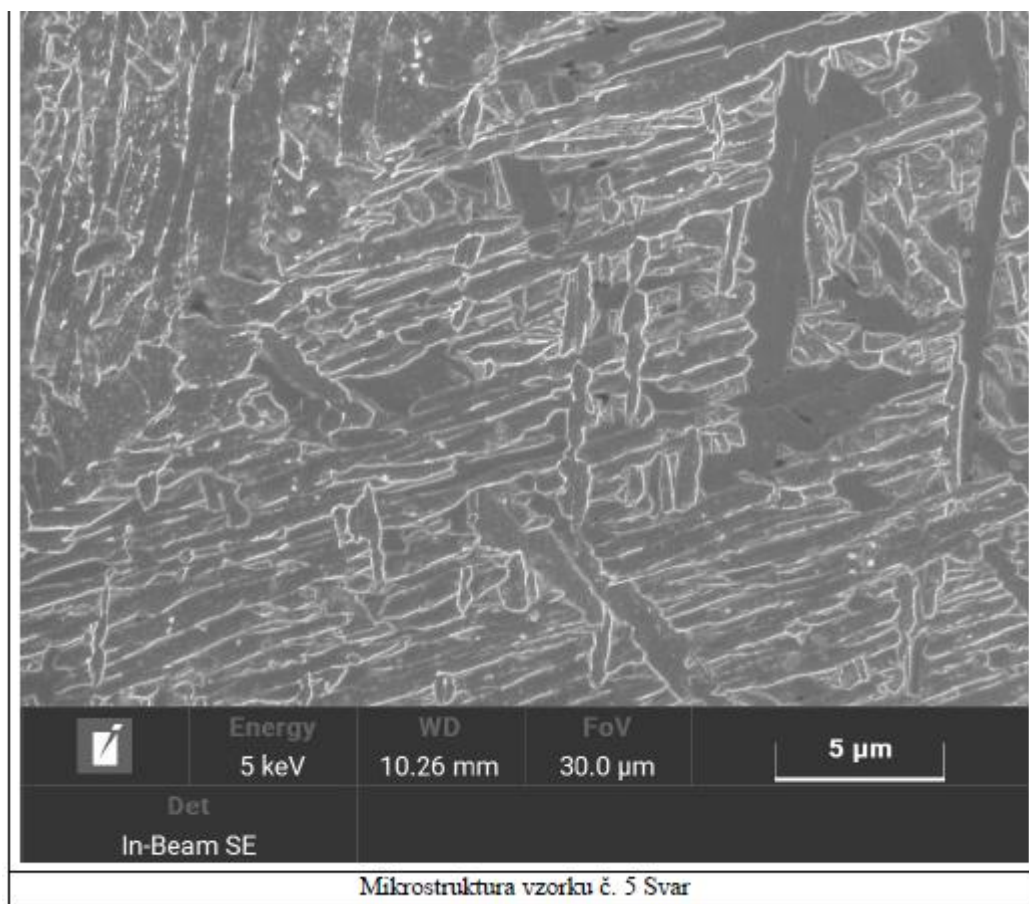
Příloha 3



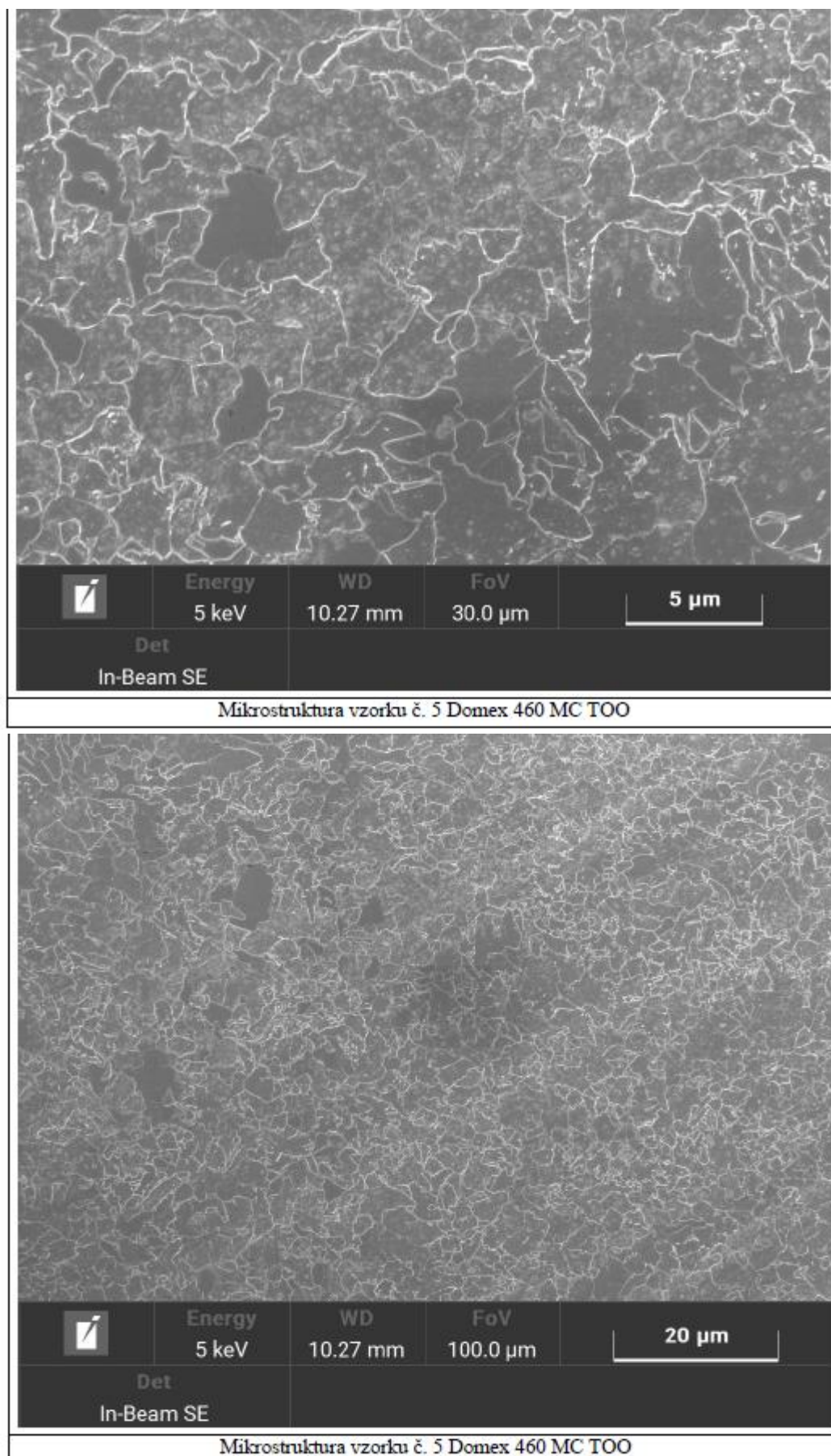
Příloha 3



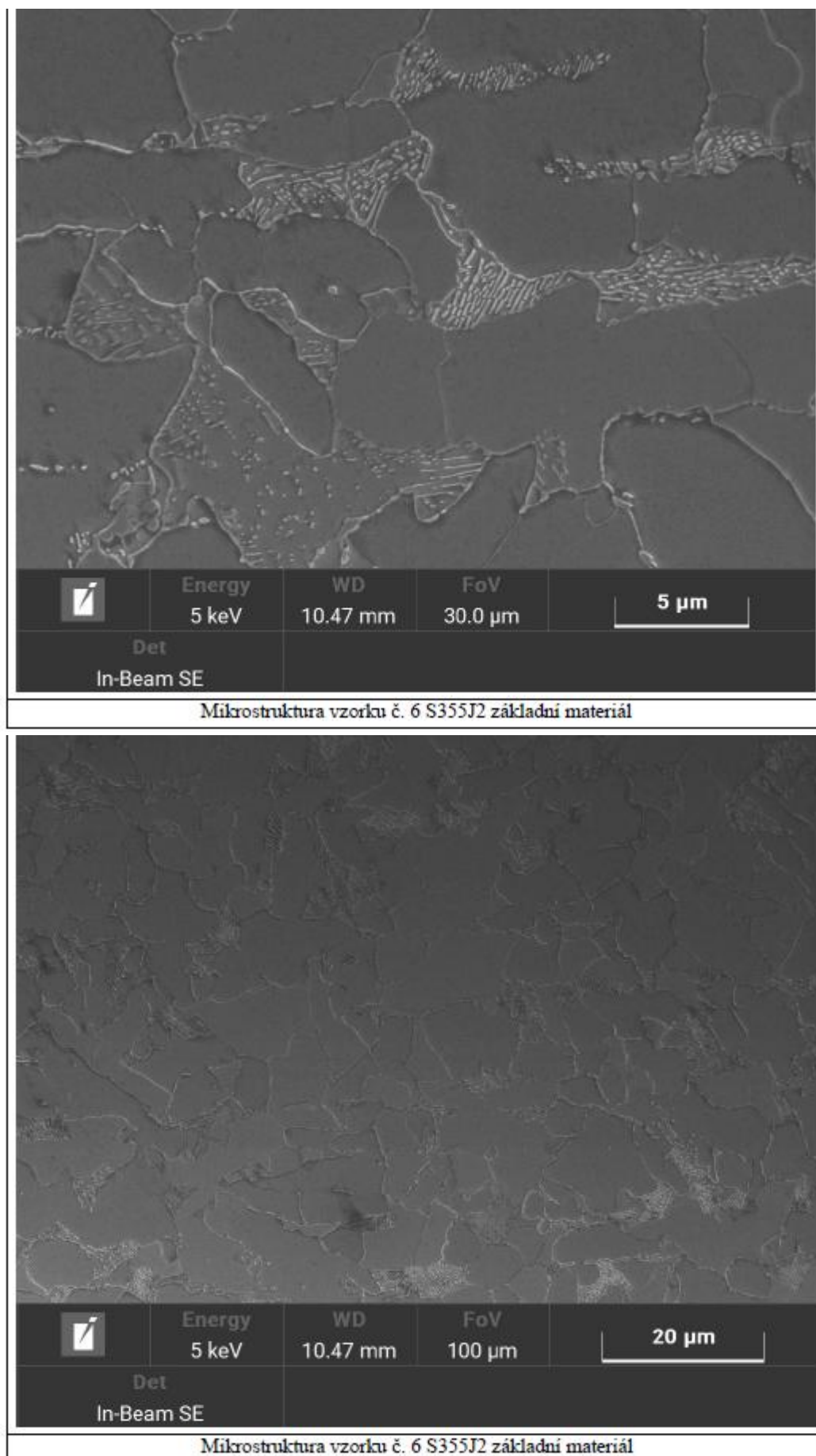
Příloha 3



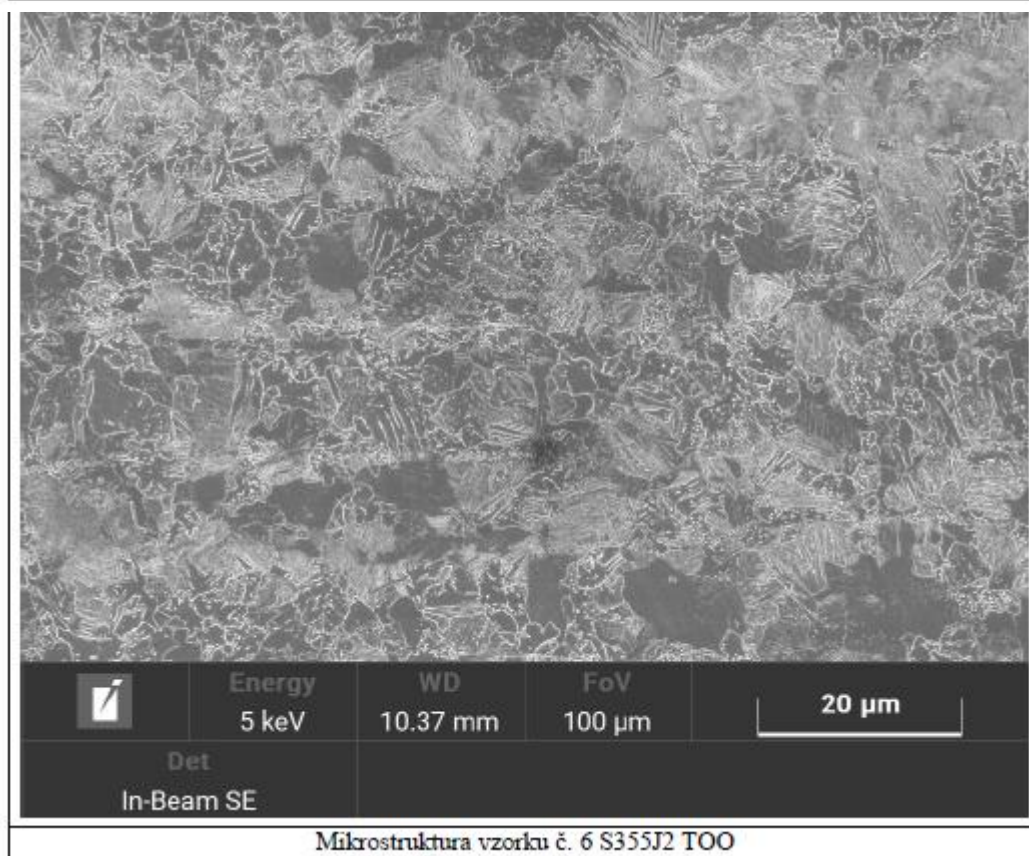
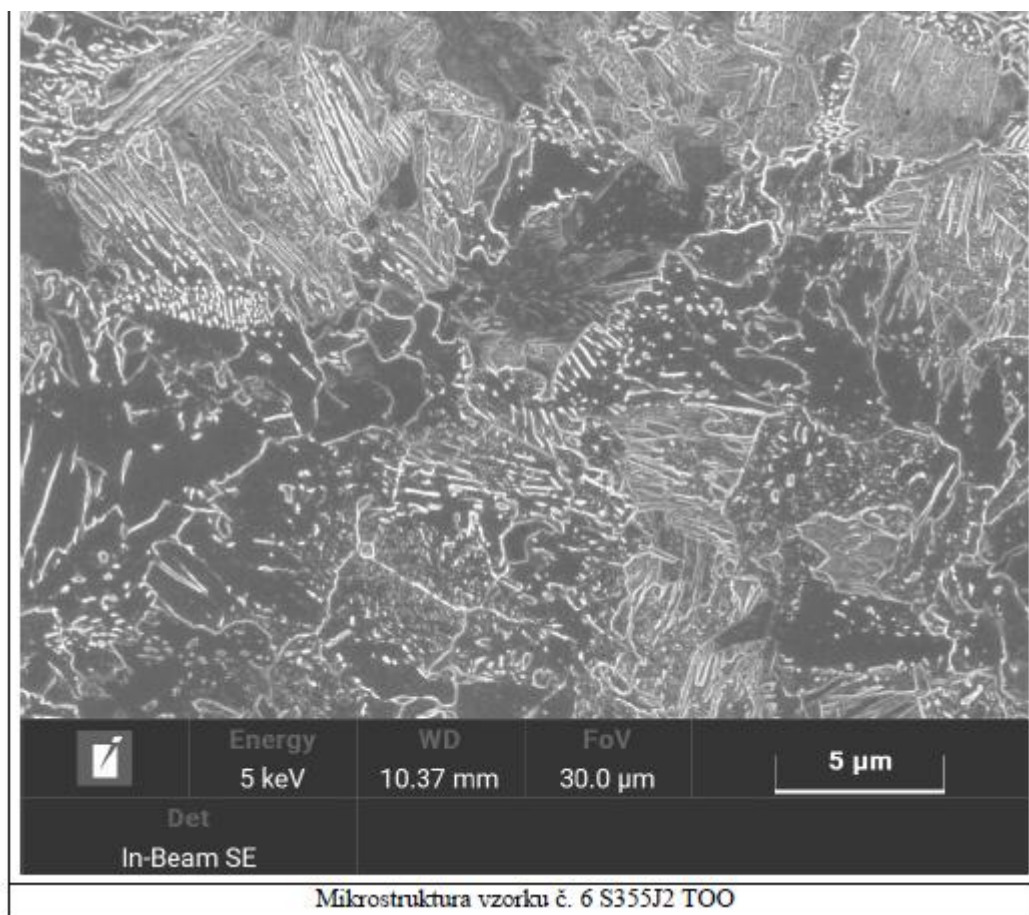
Příloha 3



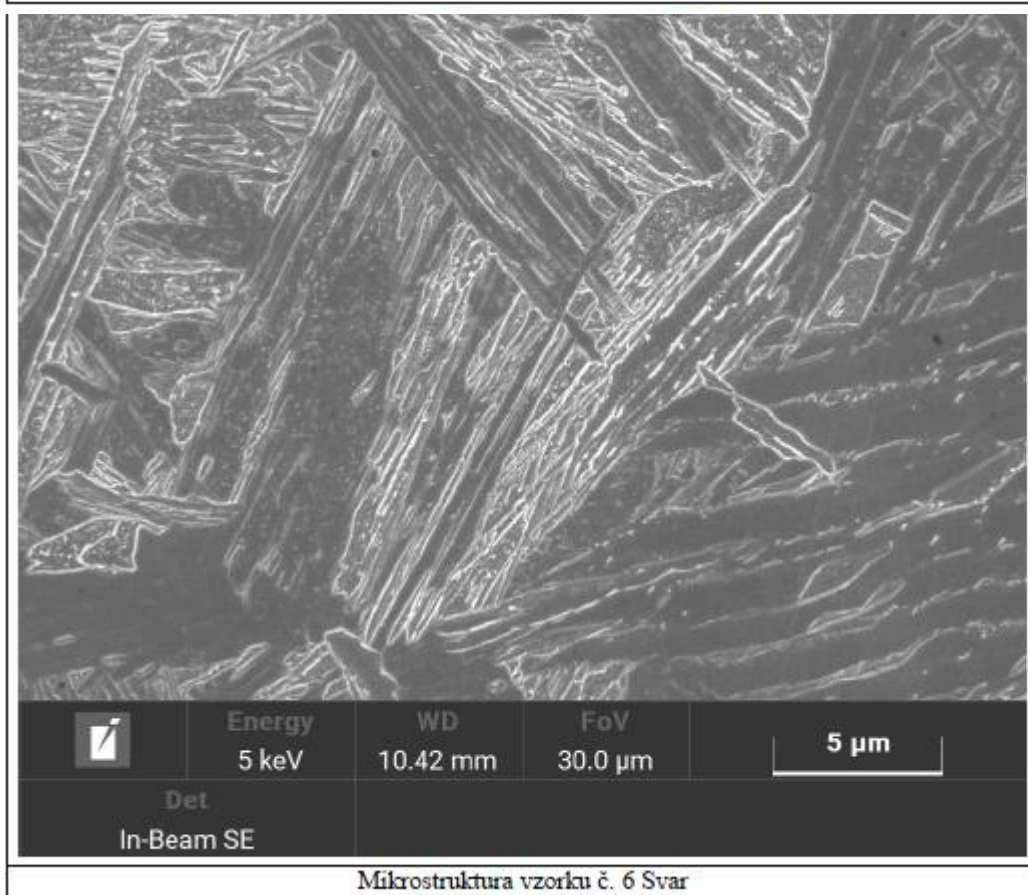
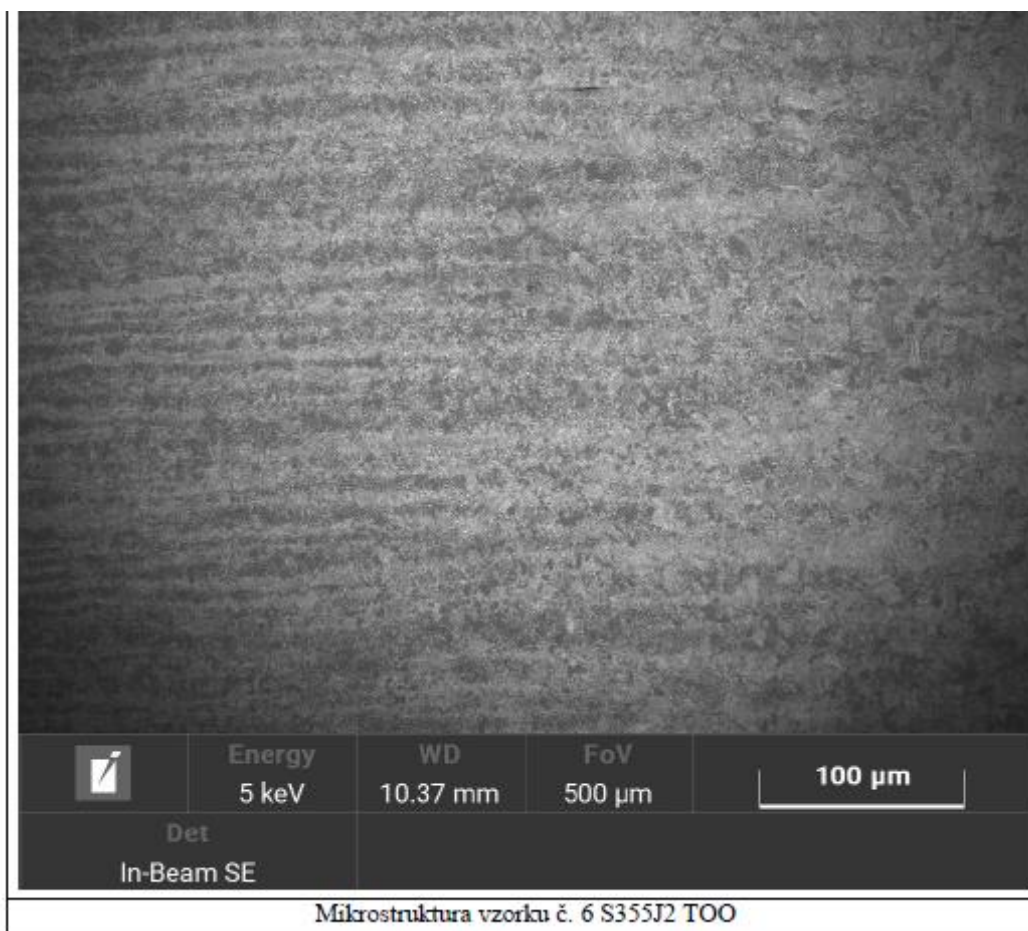
Příloha 3



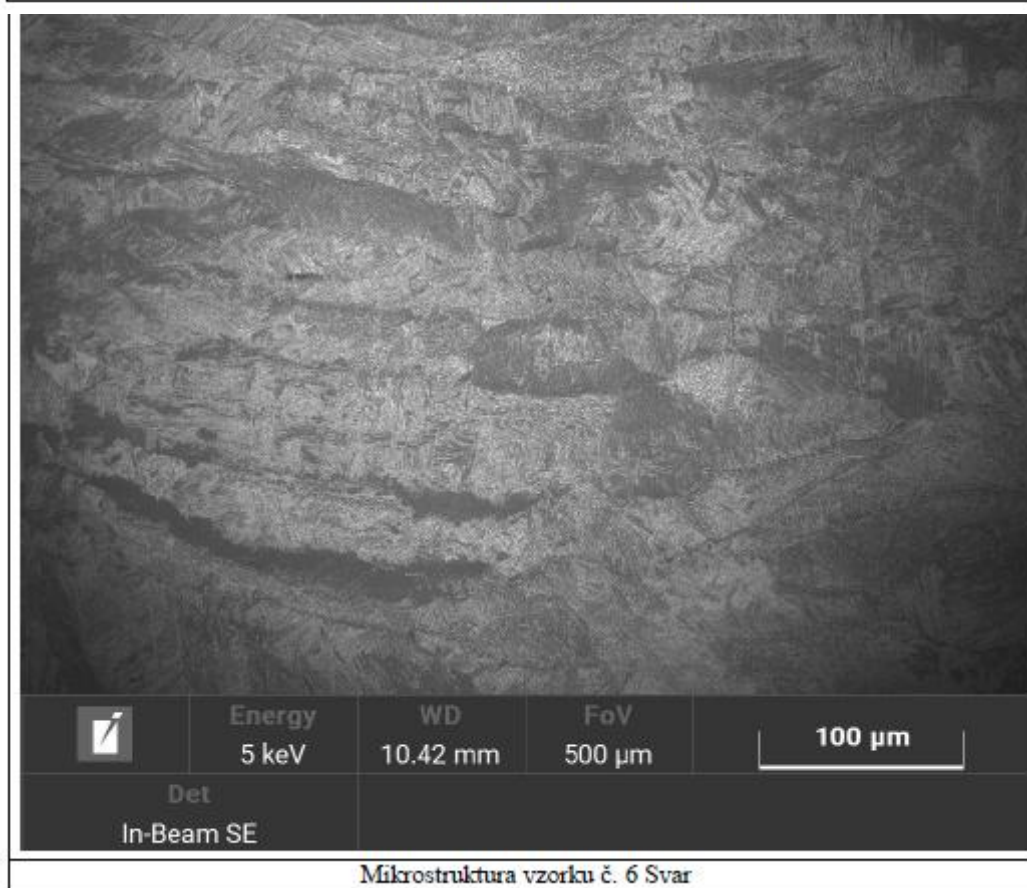
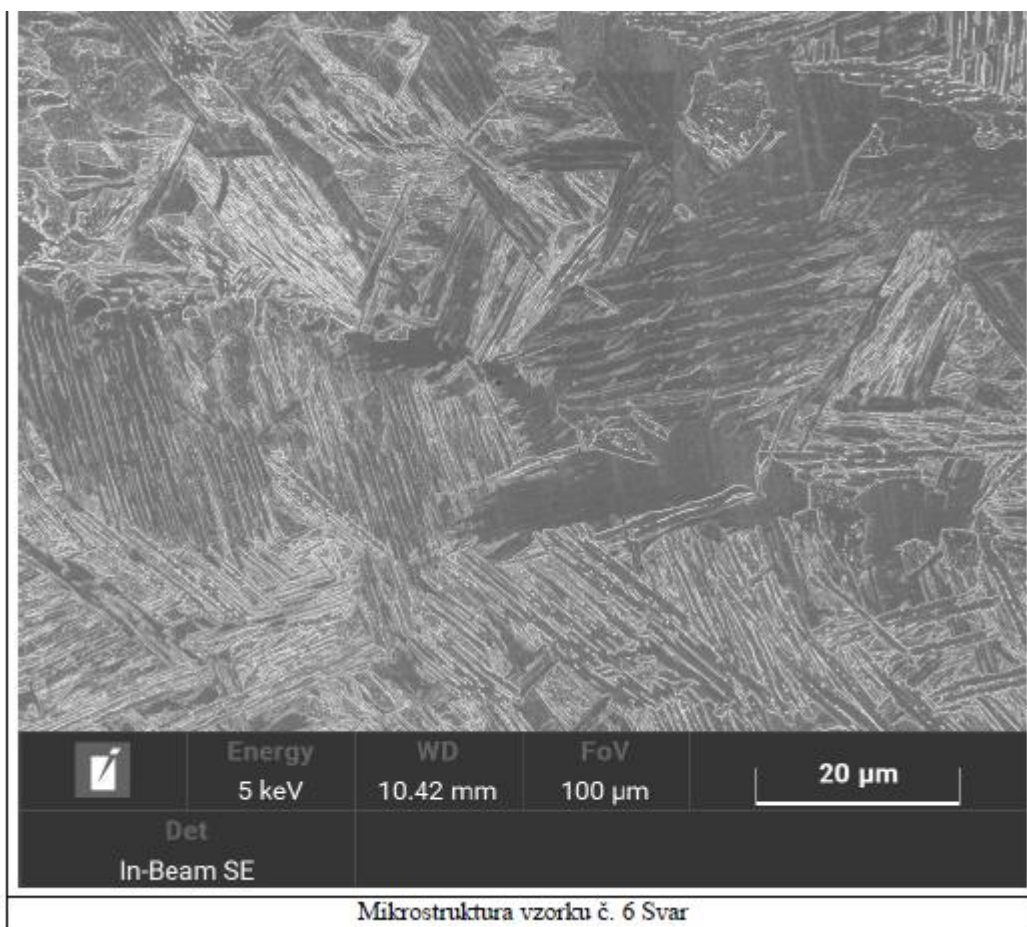
Příloha 3



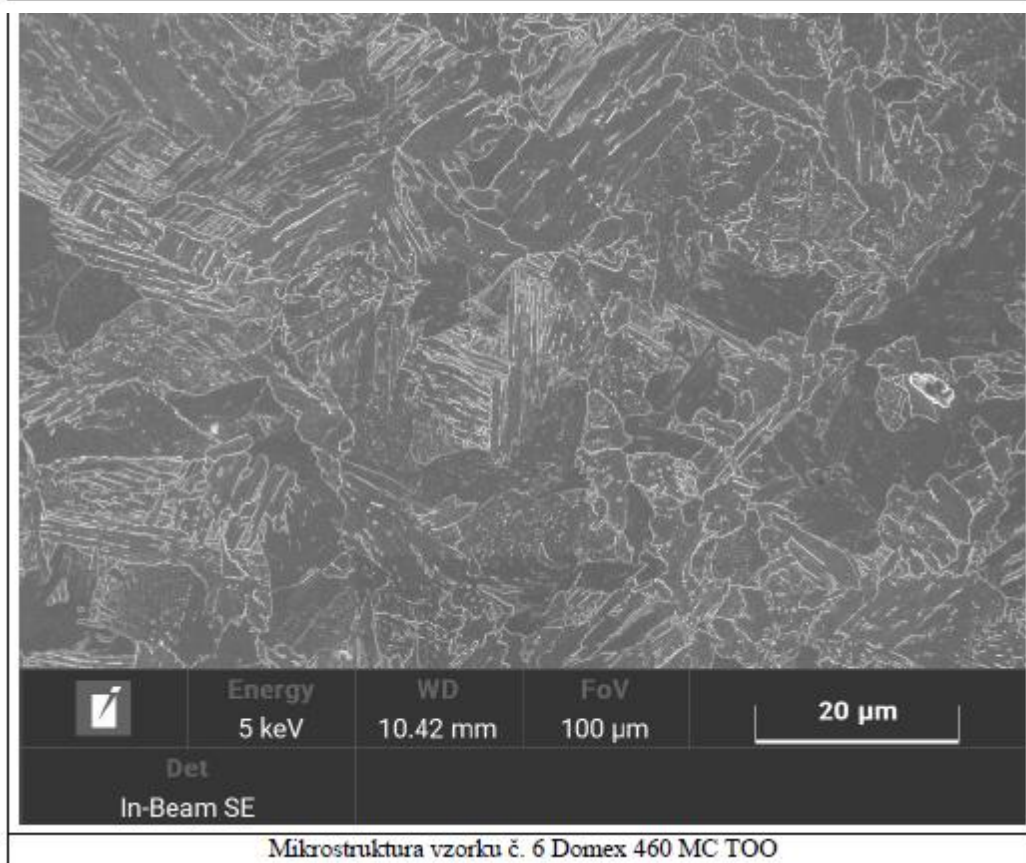
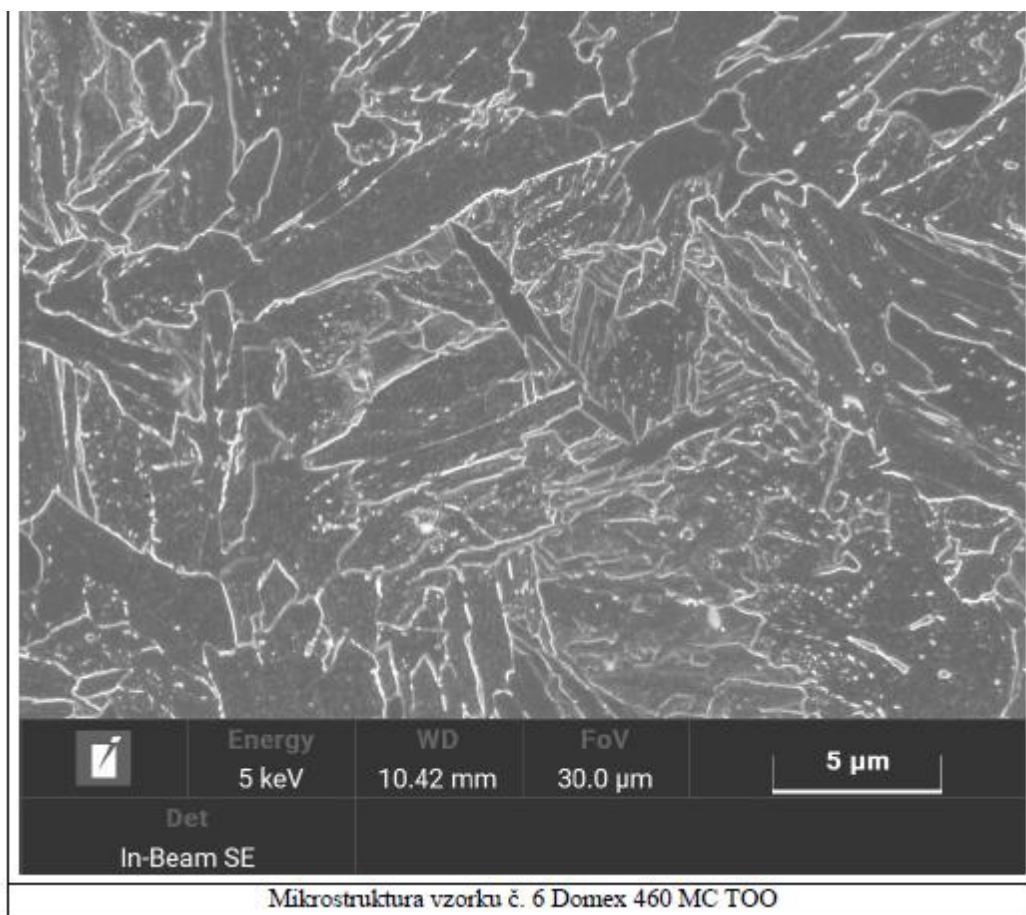
Příloha 3



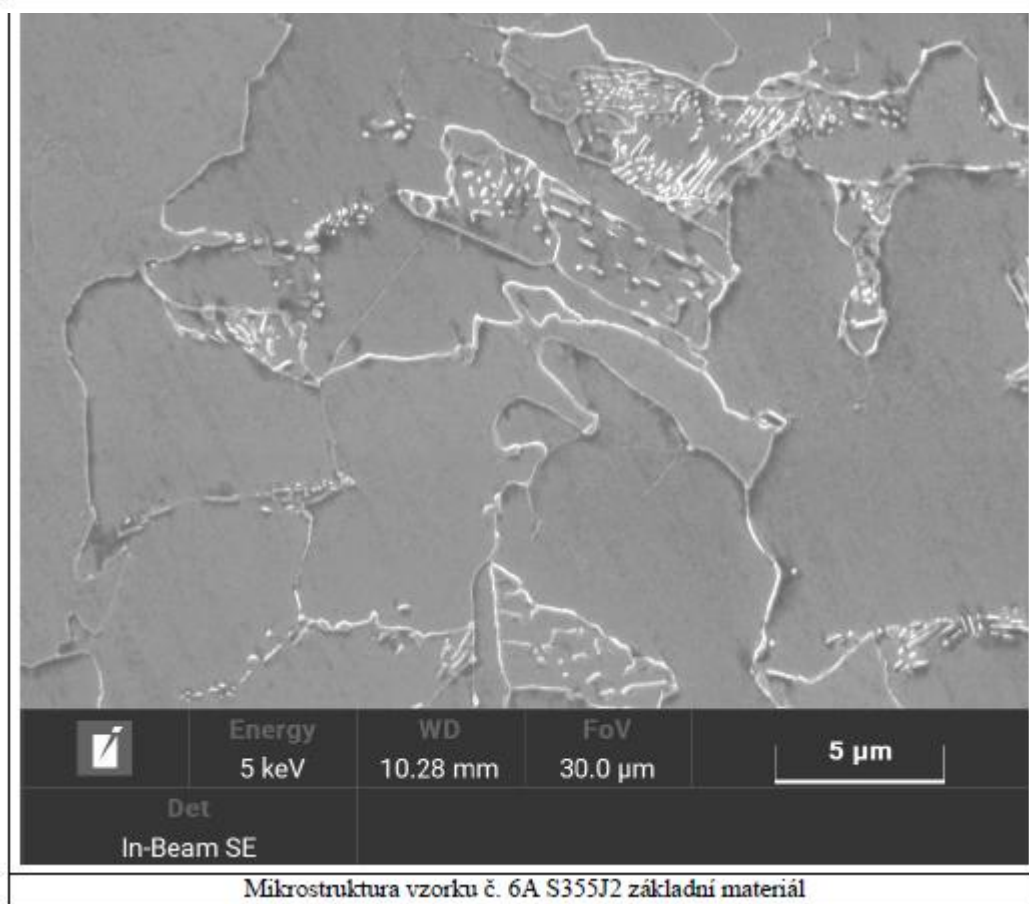
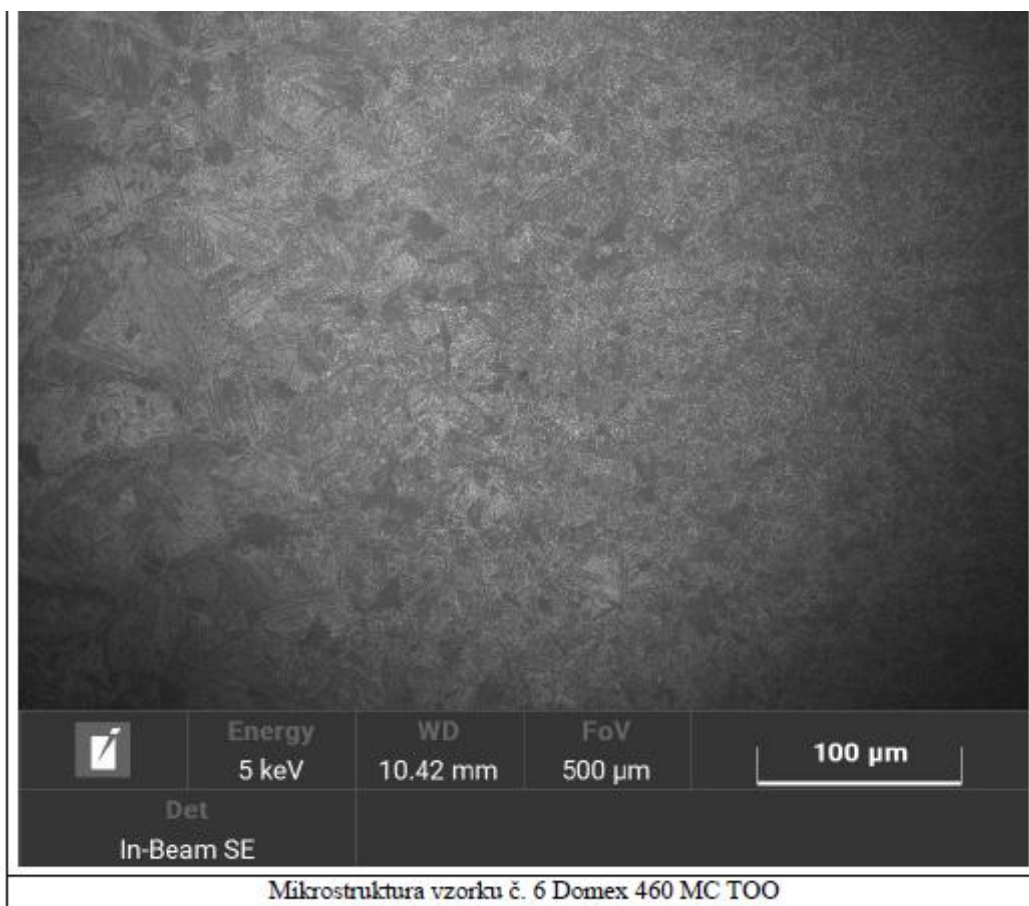
Příloha 3



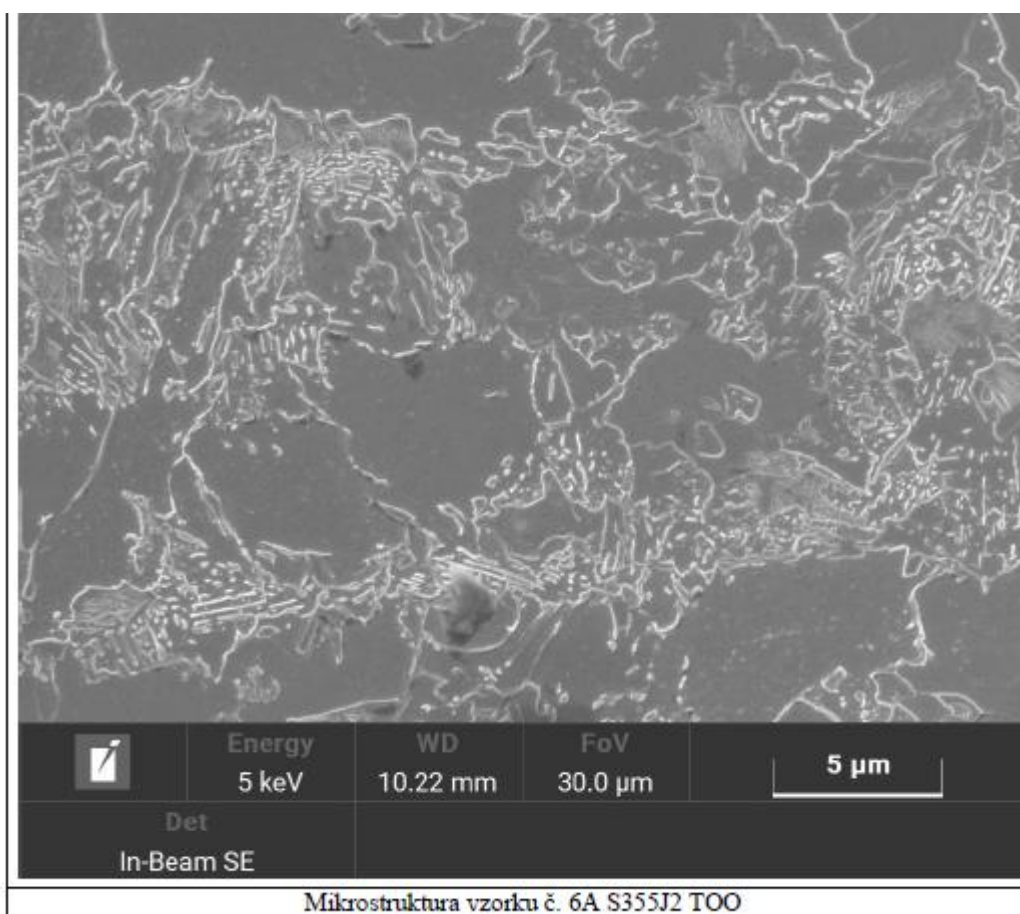
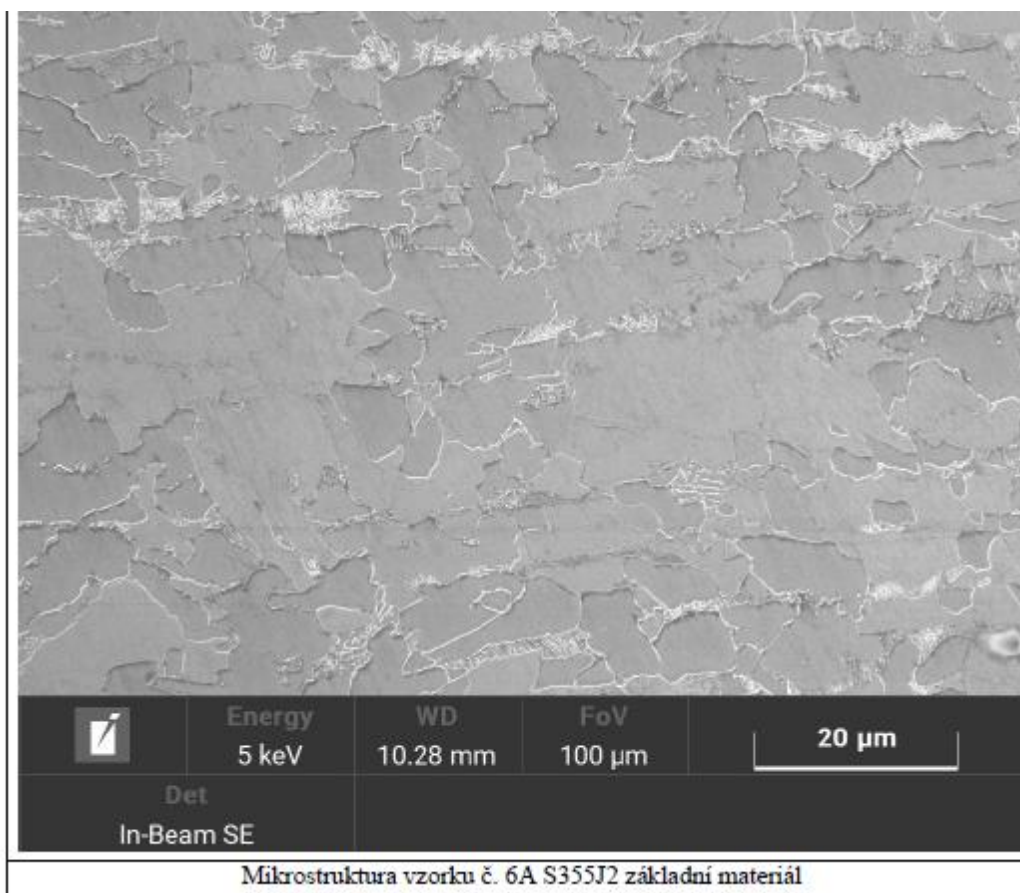
Příloha 3



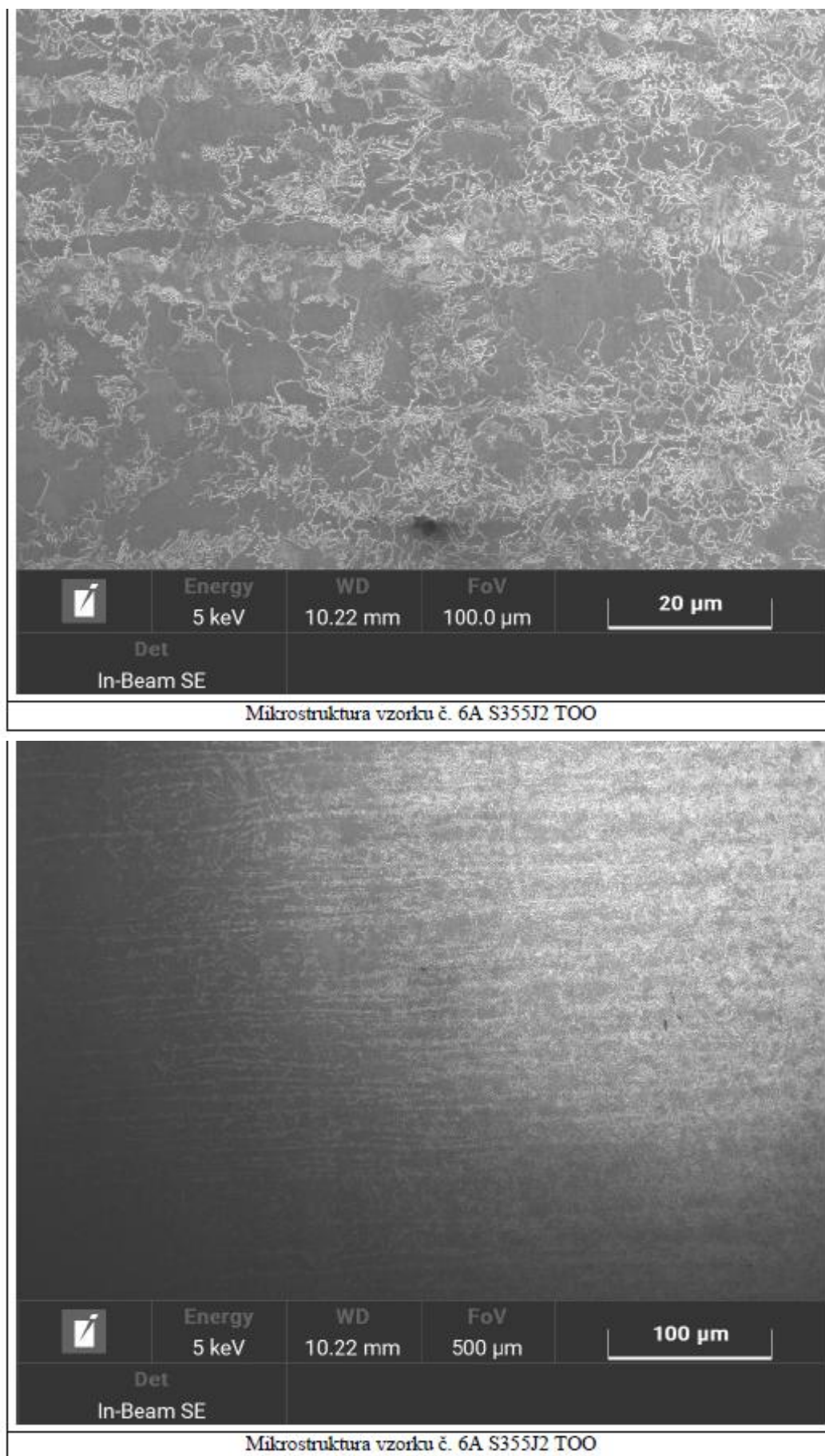
Příloha 3



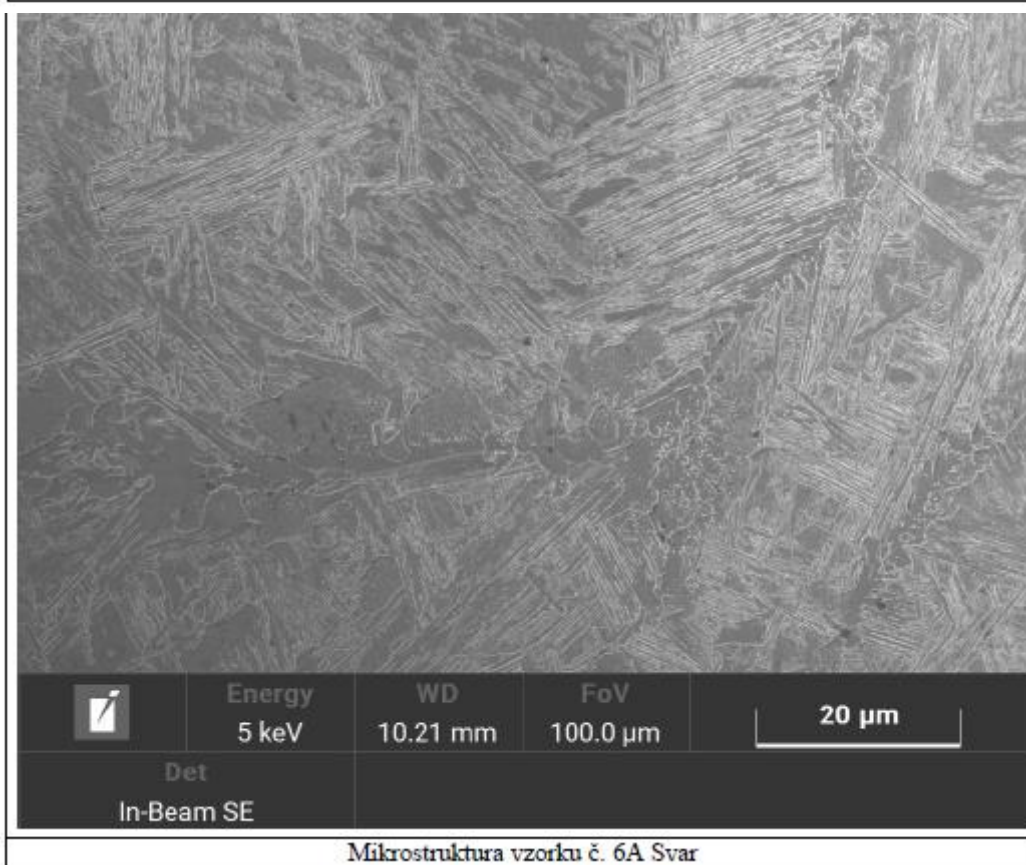
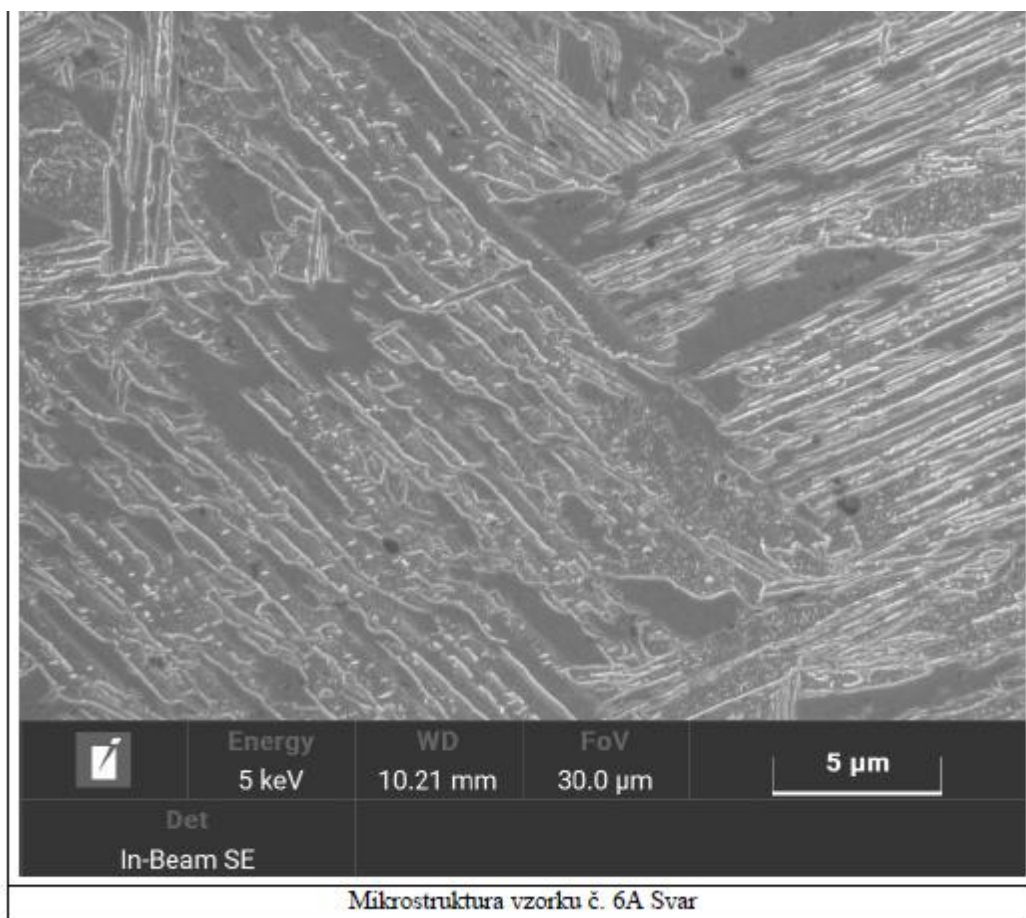
Příloha 3



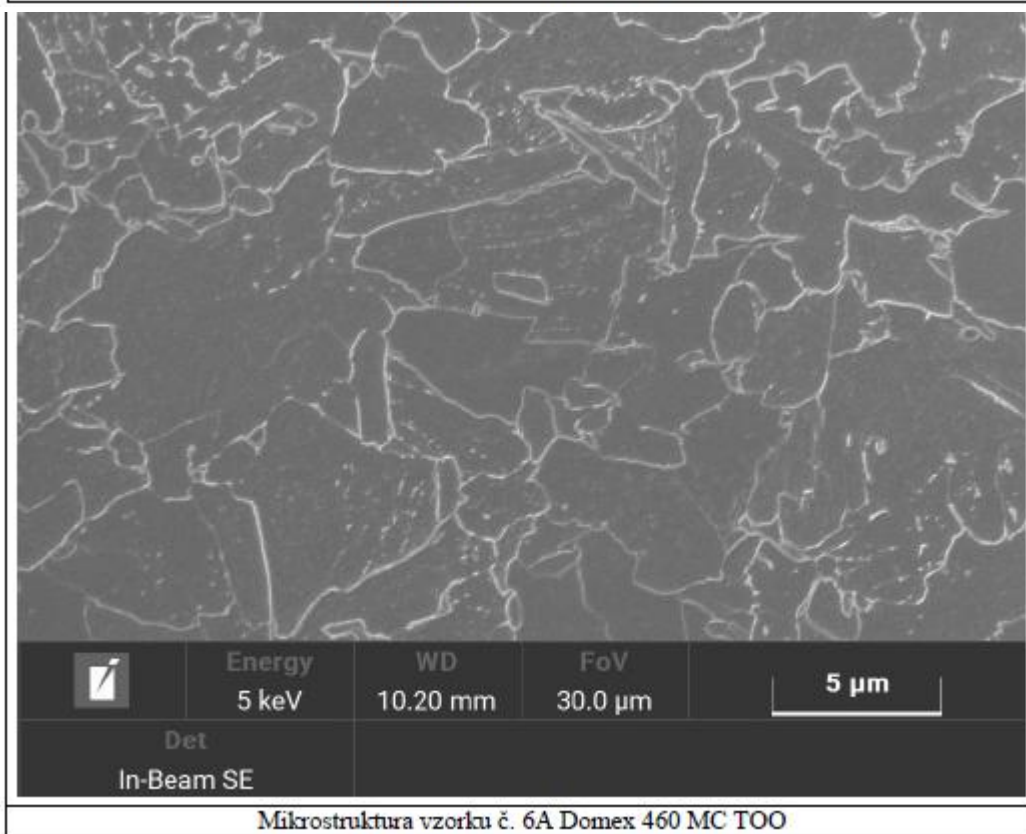
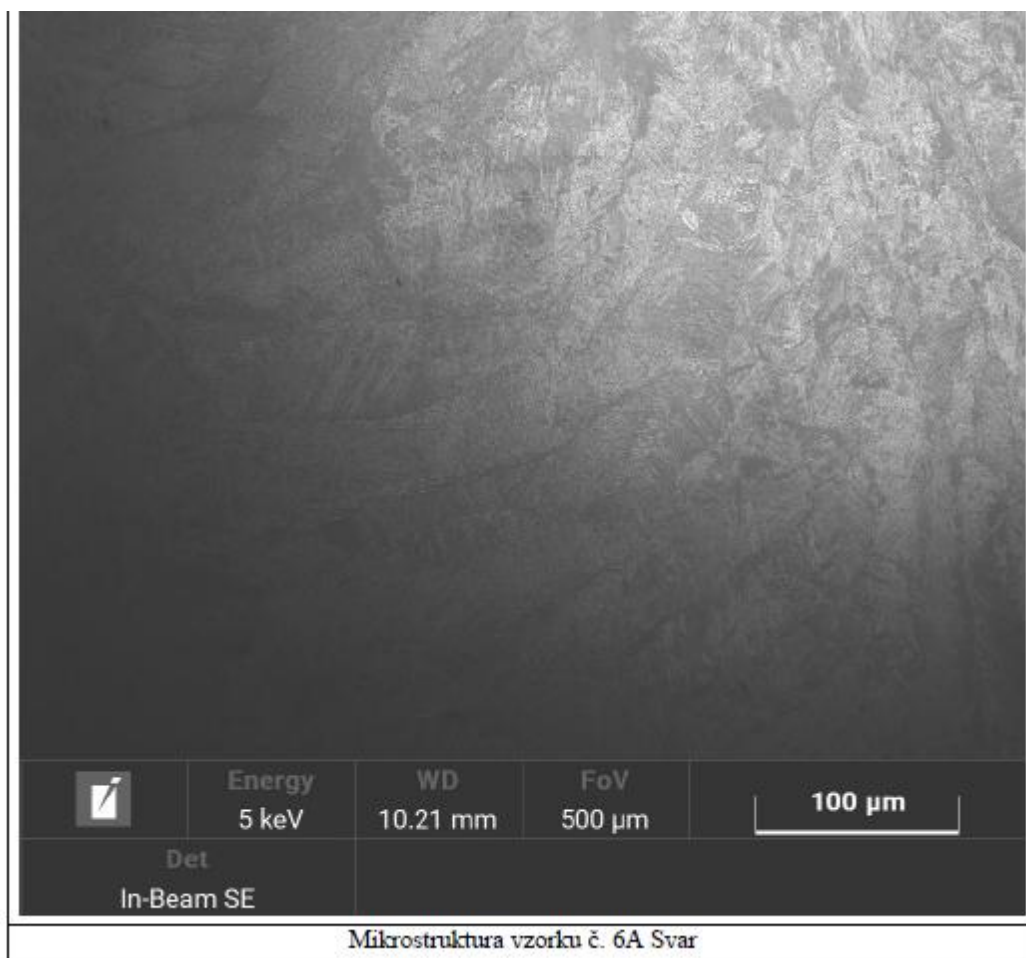
Příloha 3



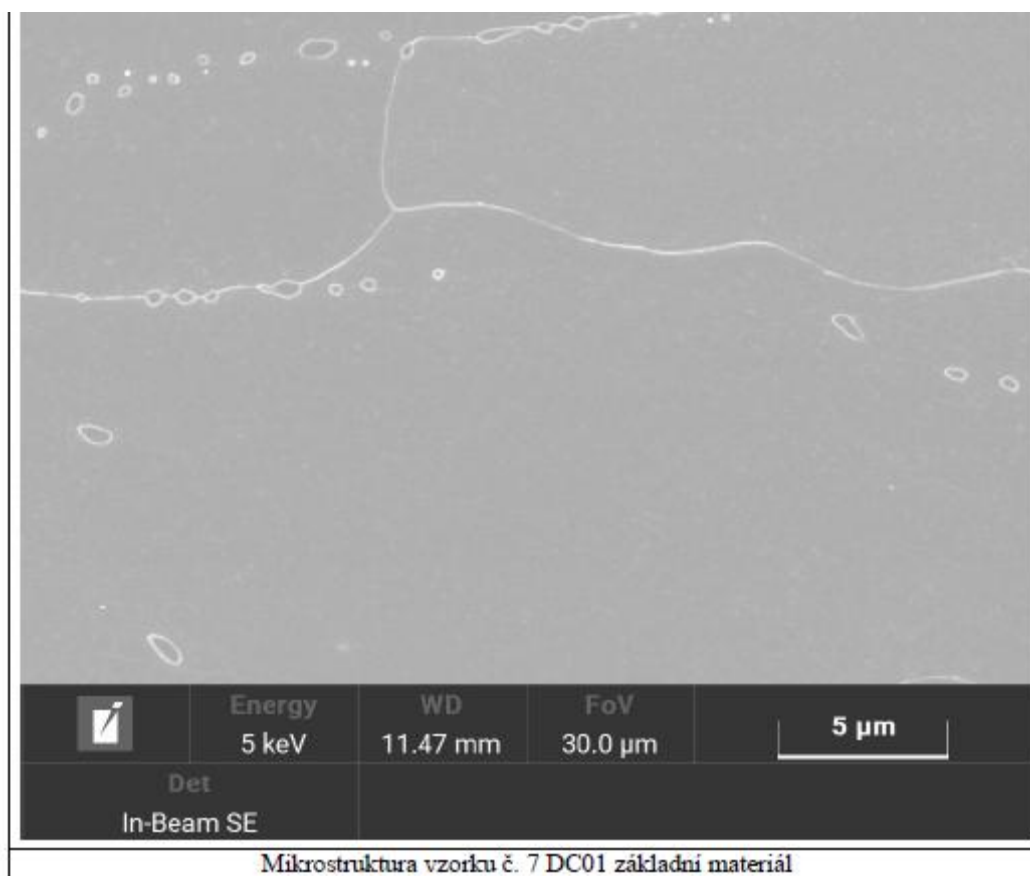
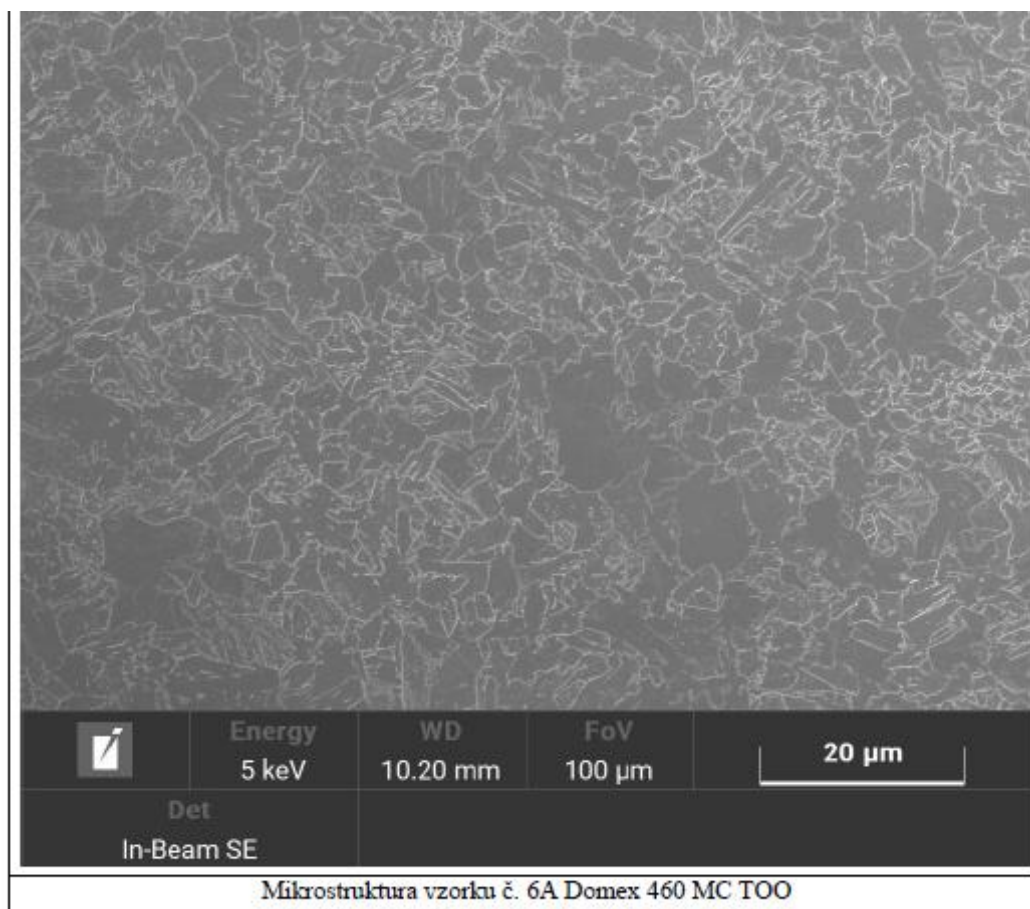
Příloha 3



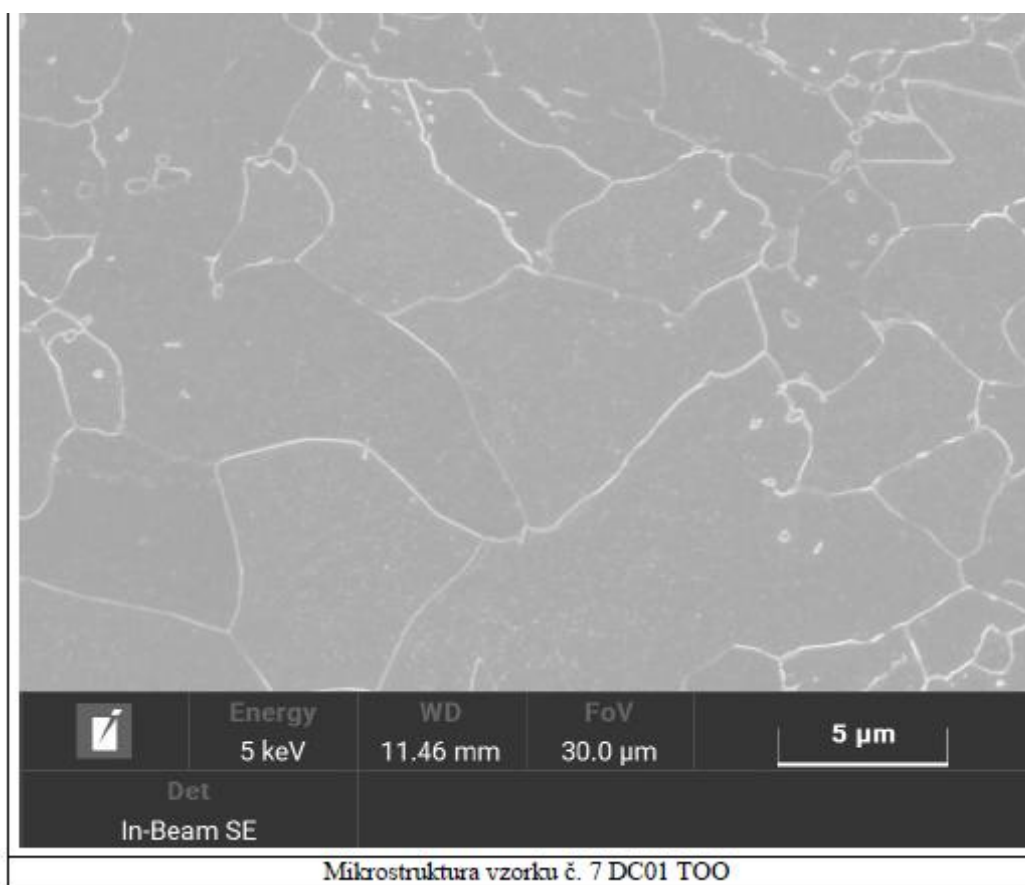
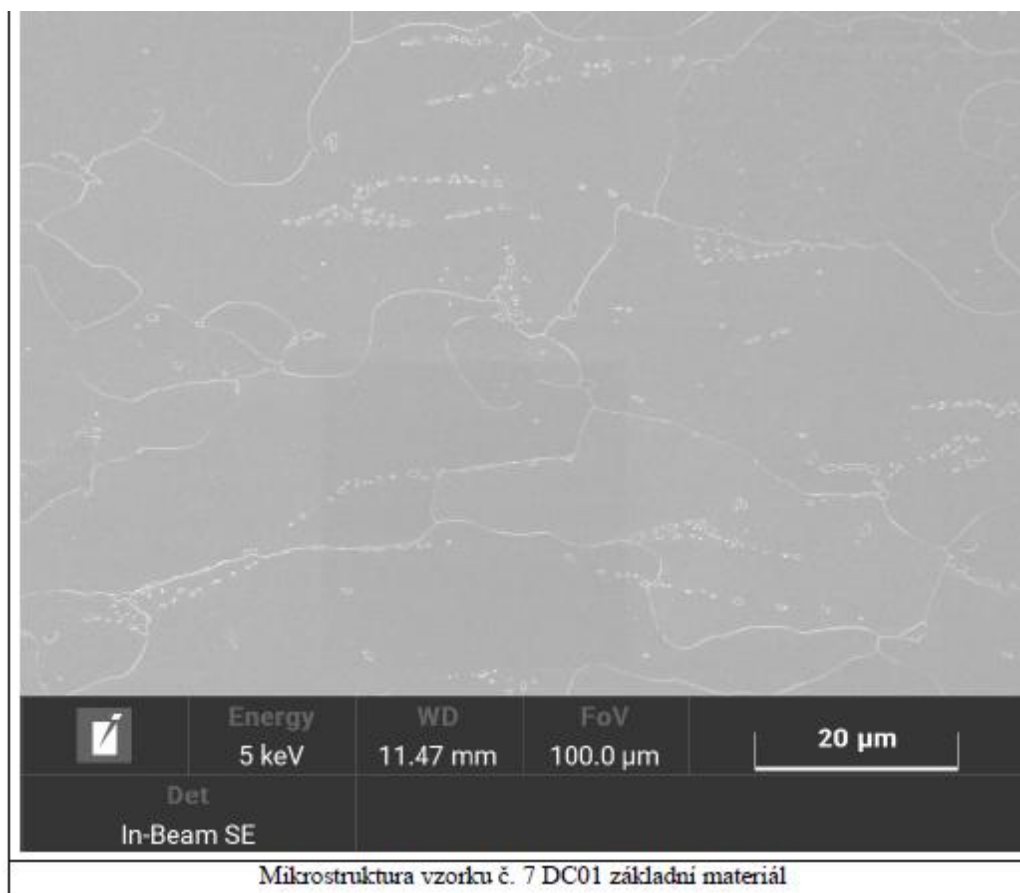
Příloha 3



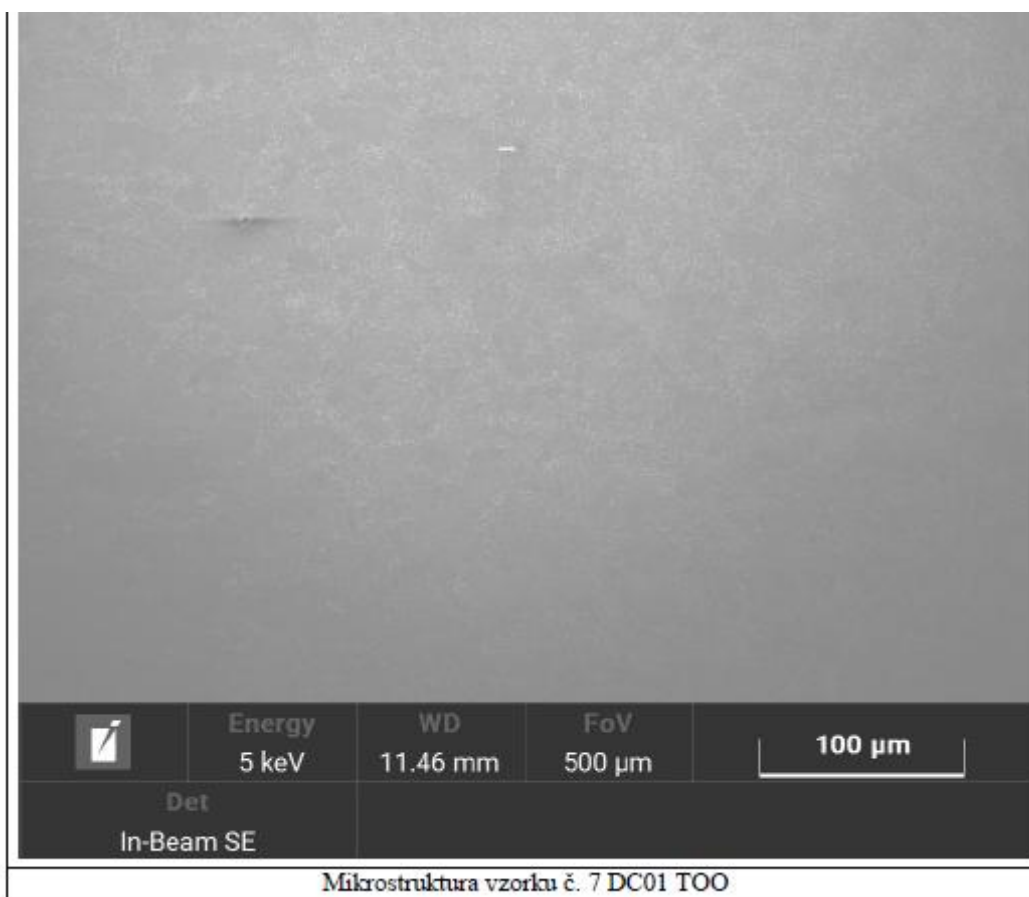
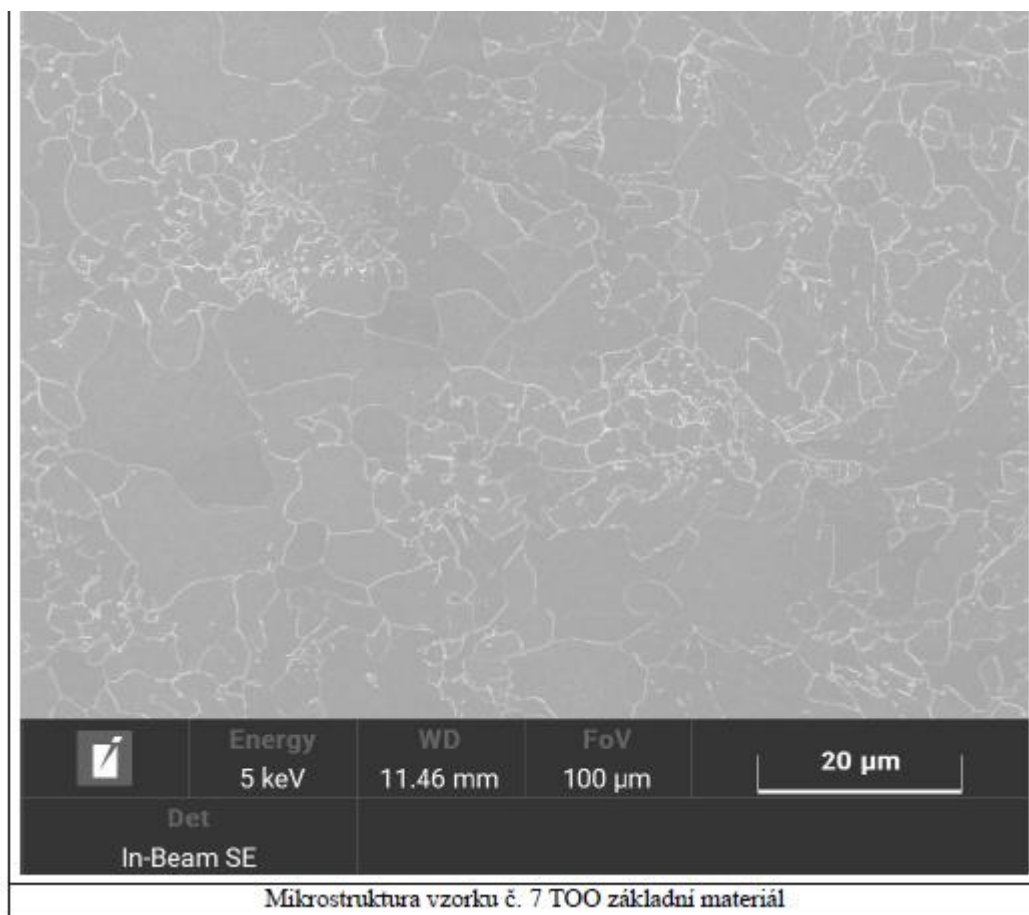
Příloha 3



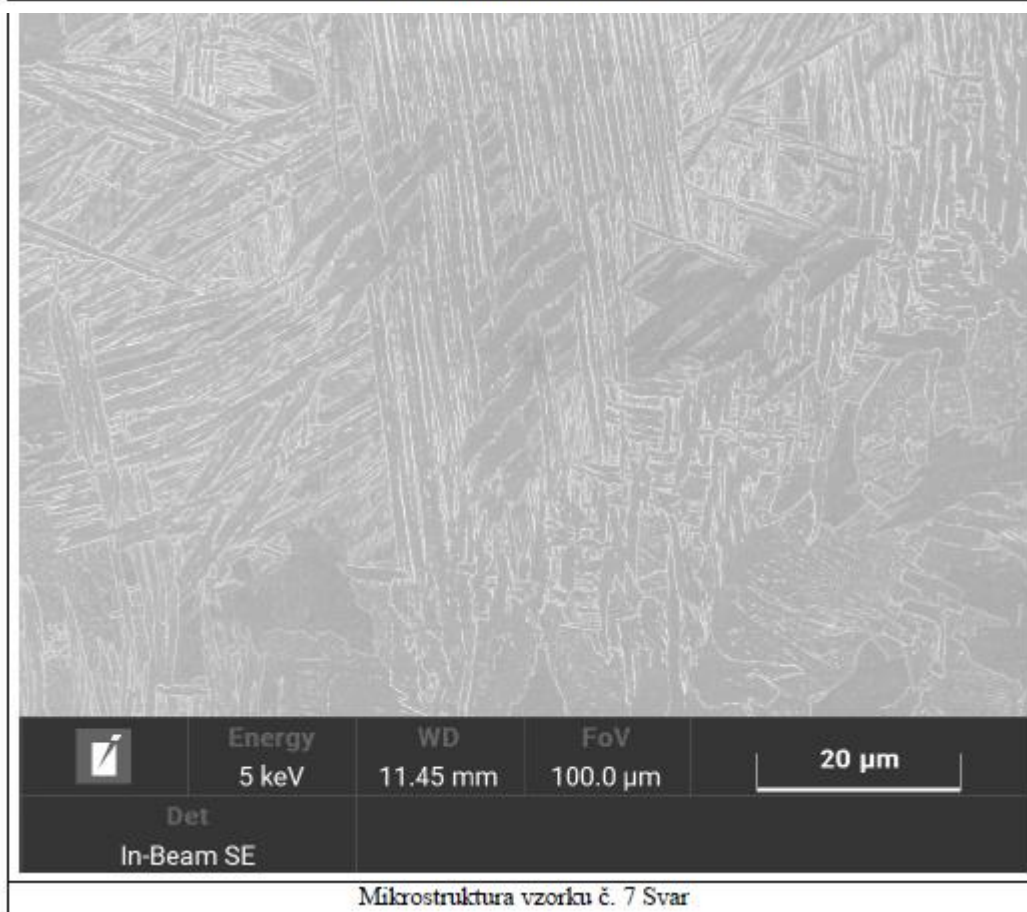
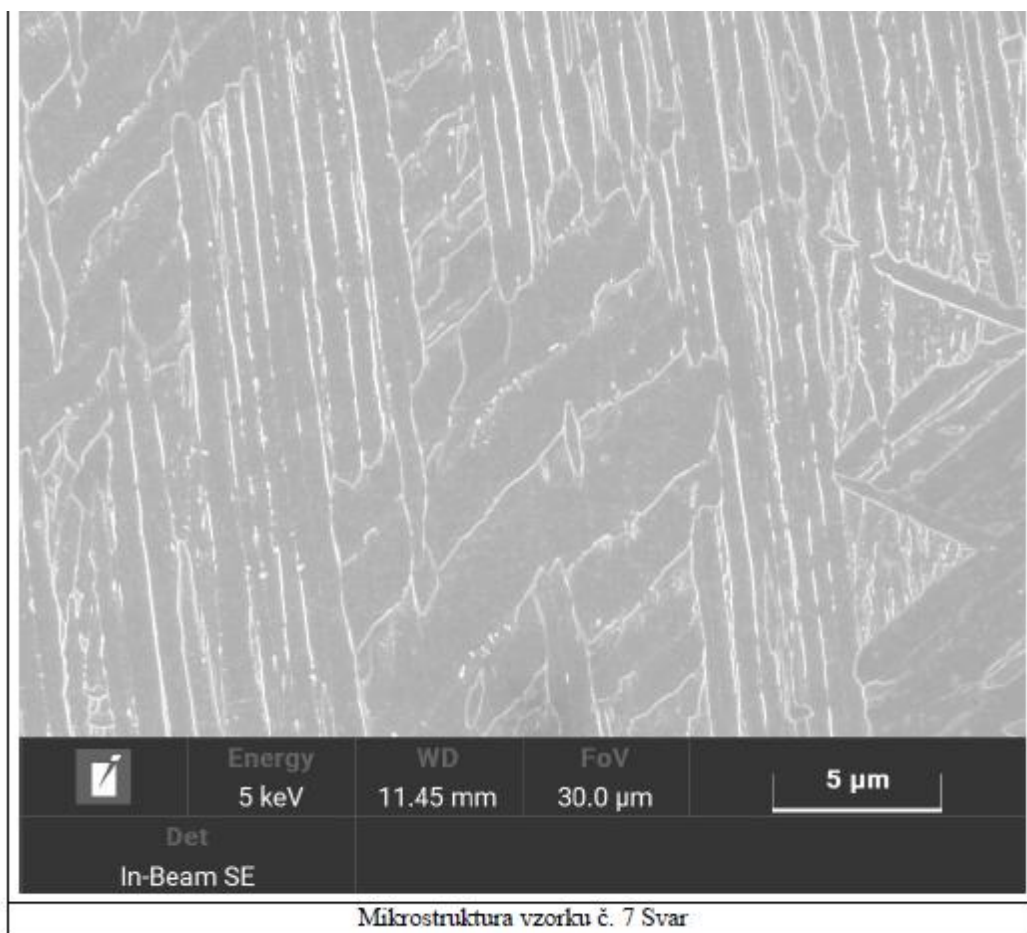
Příloha 3



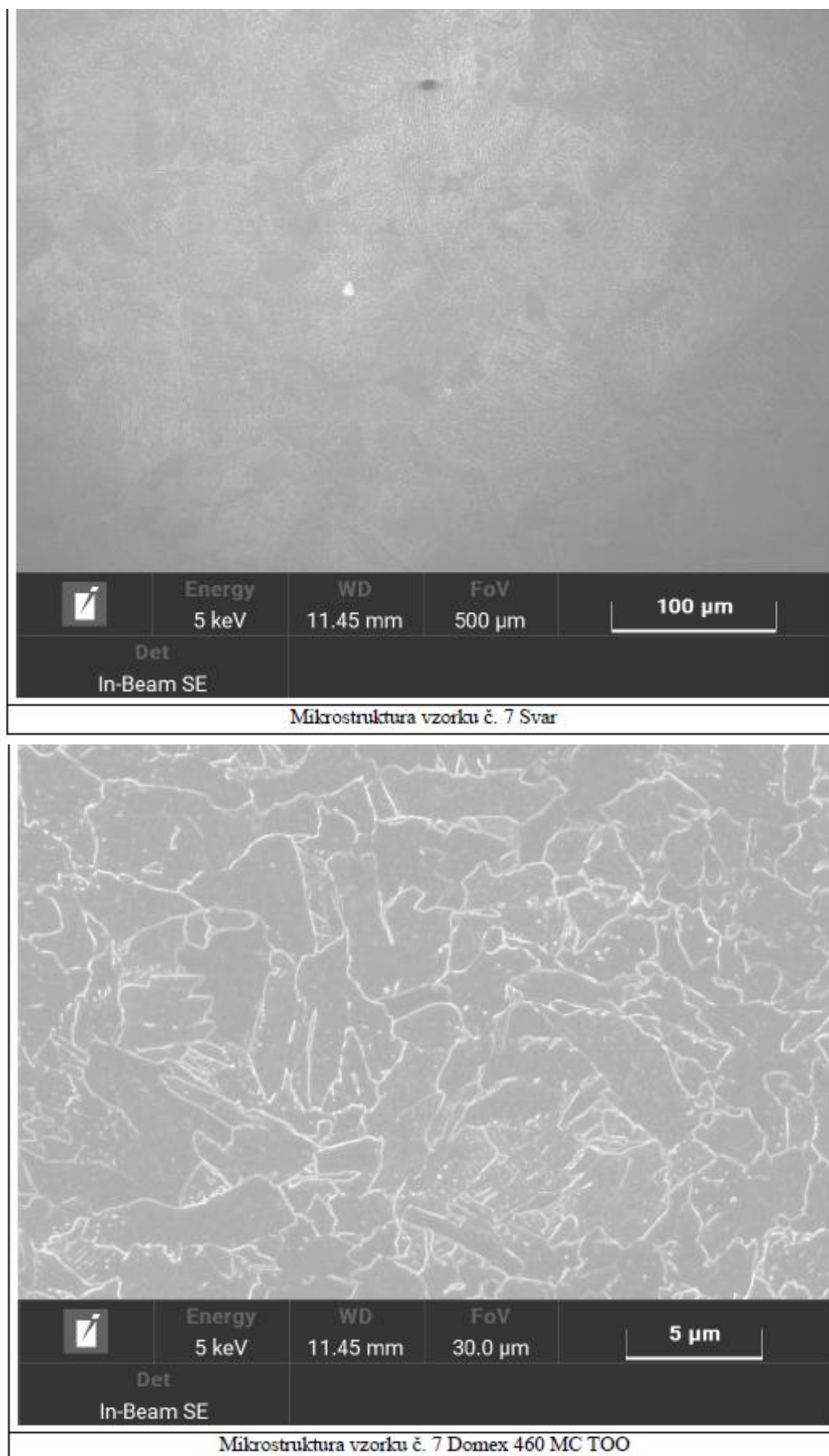
Příloha 3



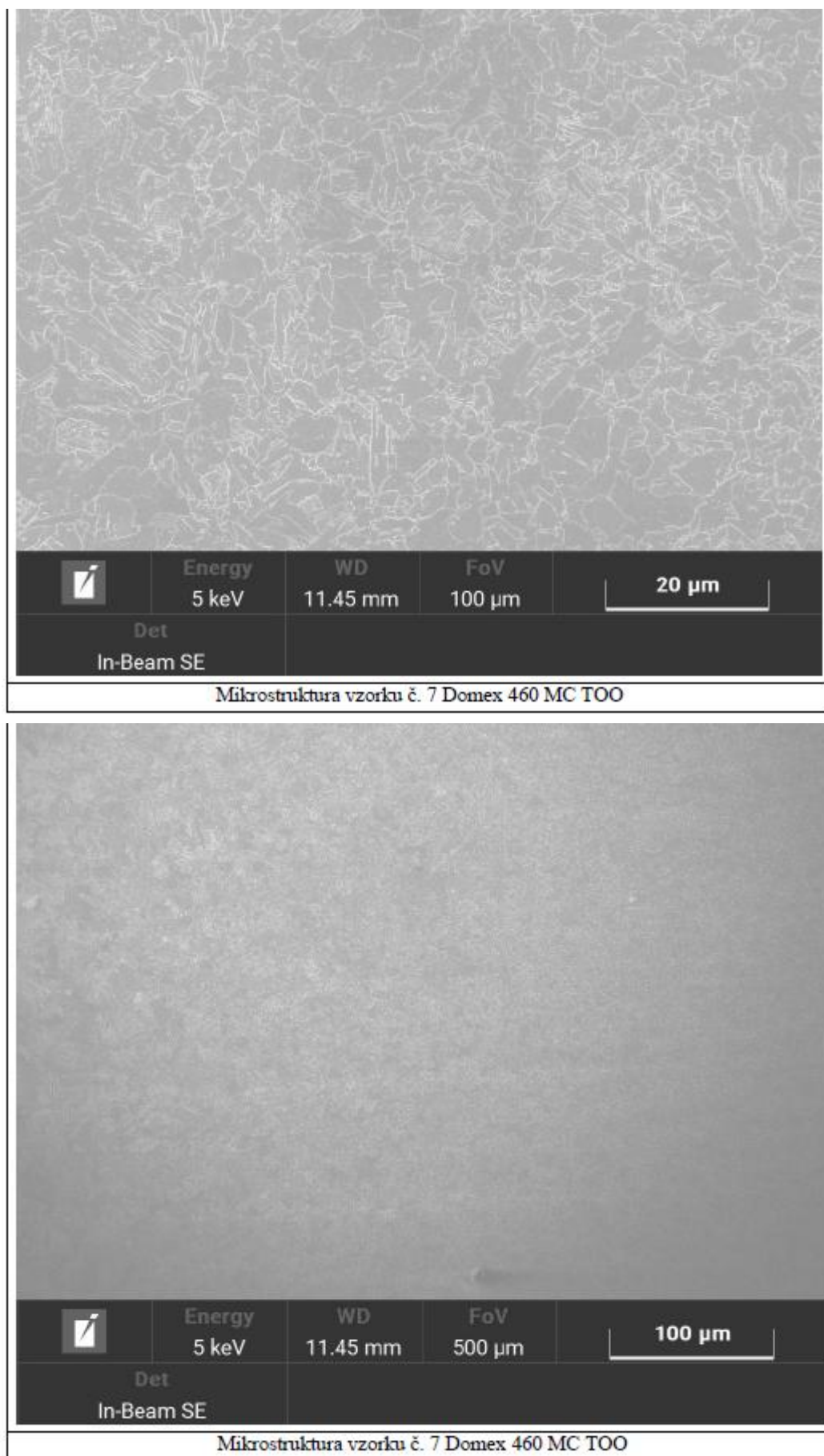
Příloha 3



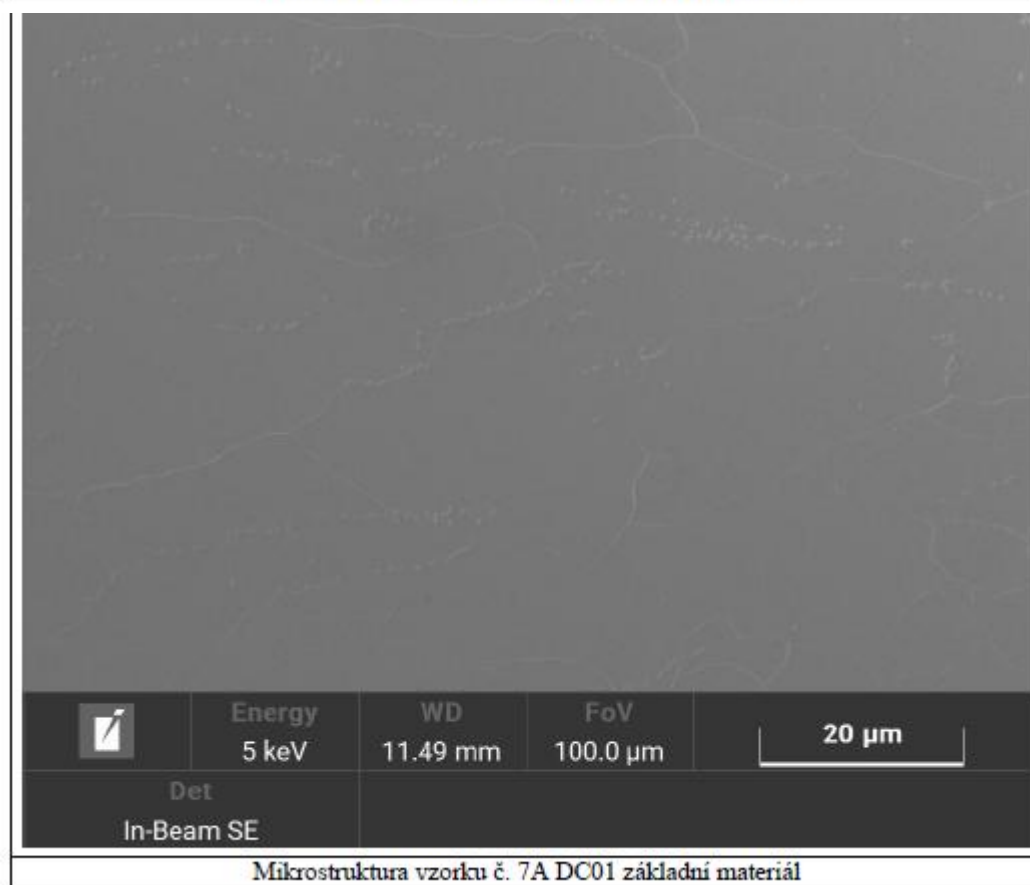
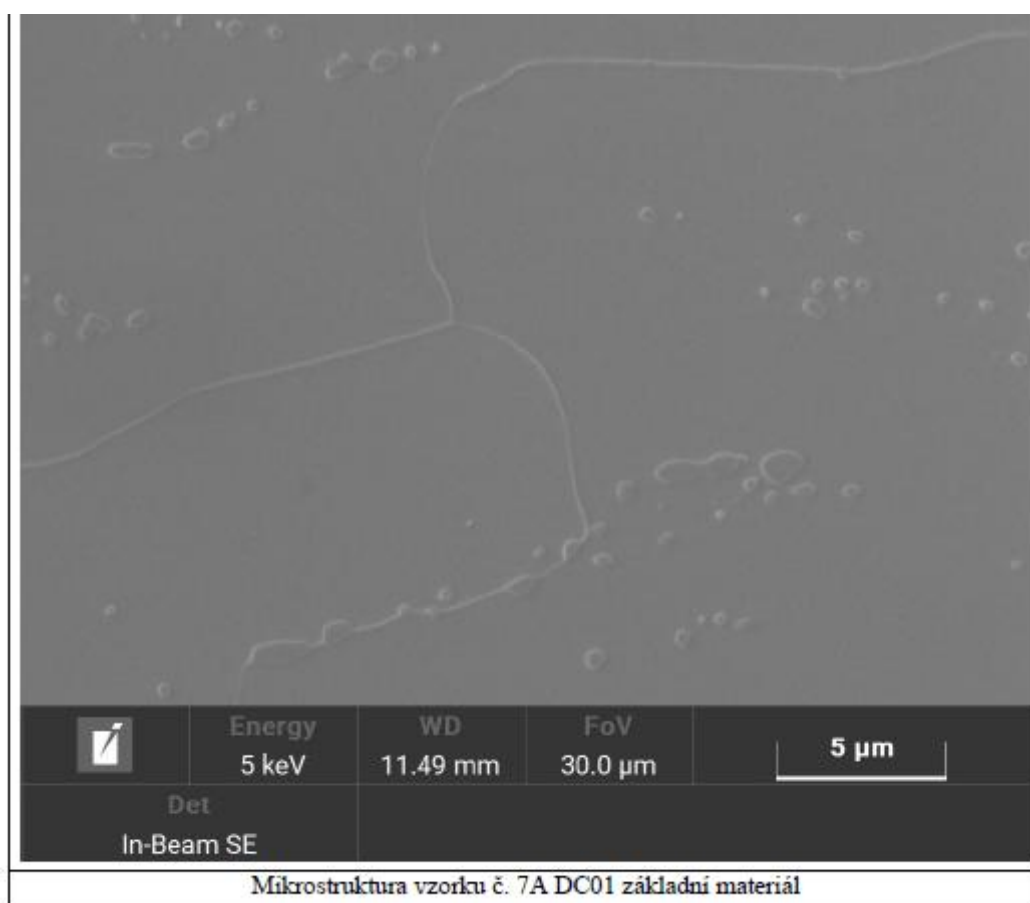
Příloha 3



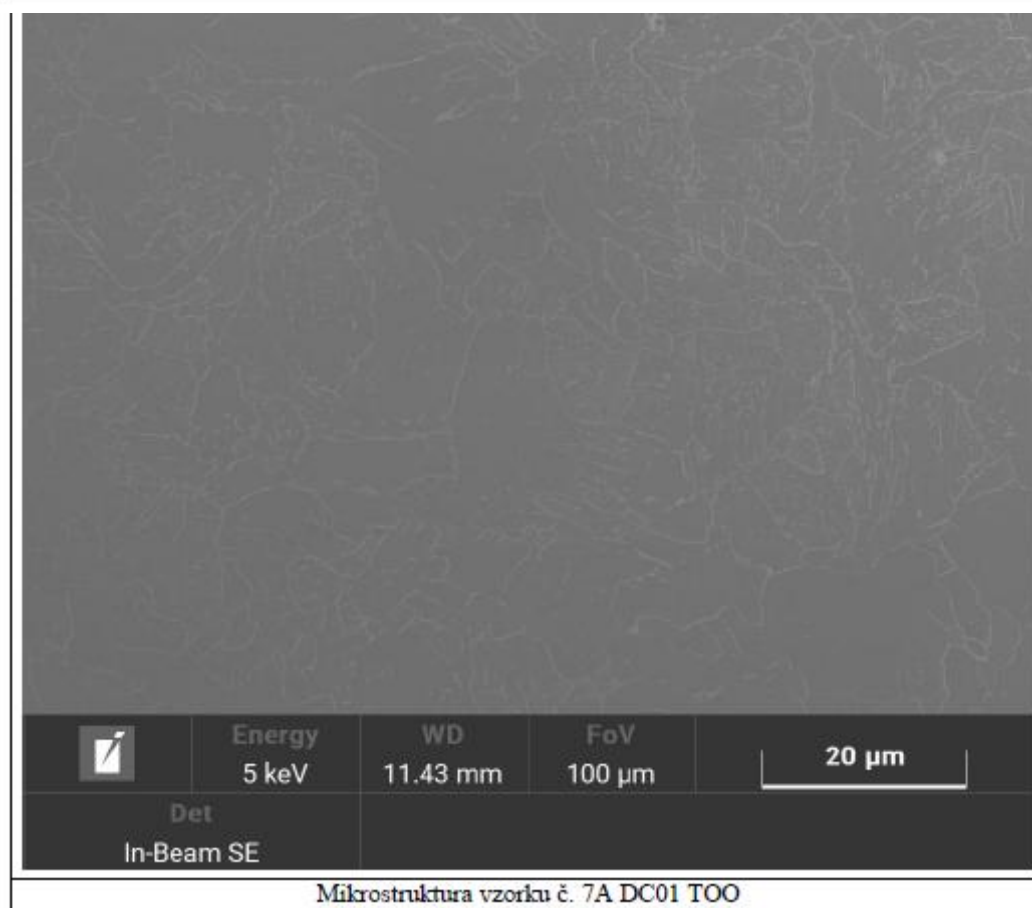
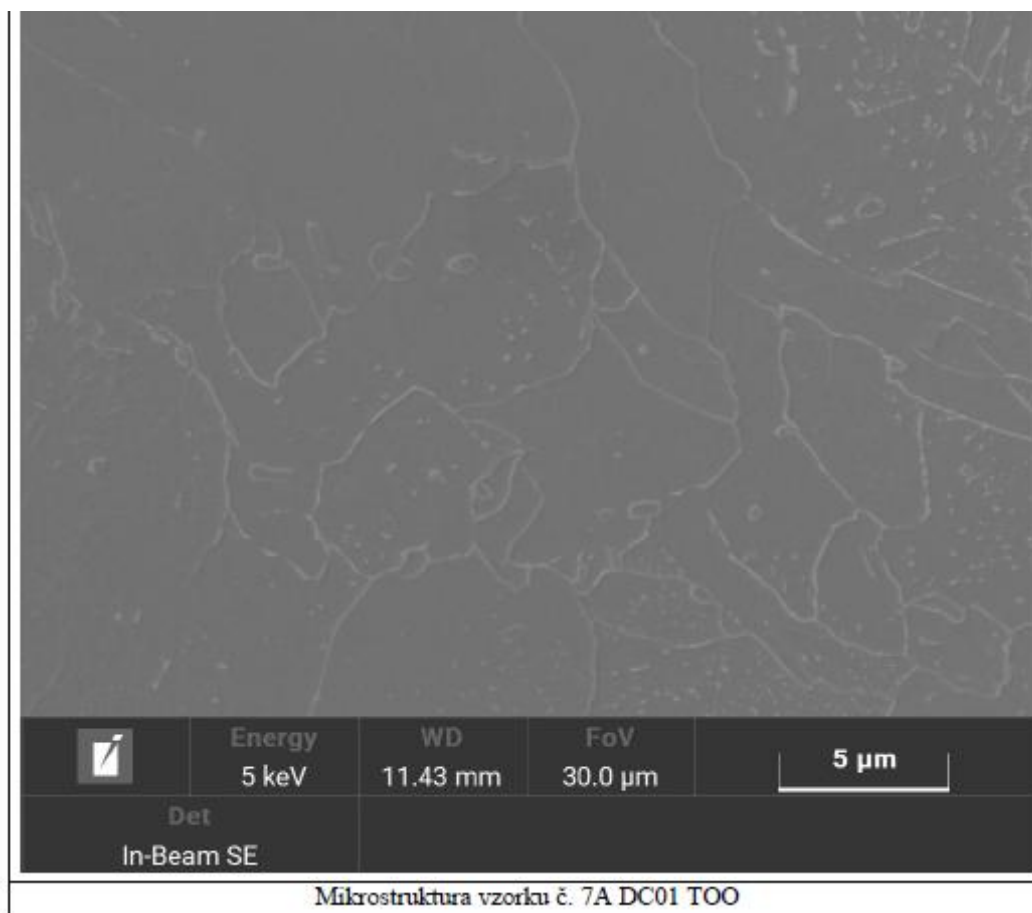
Příloha 3



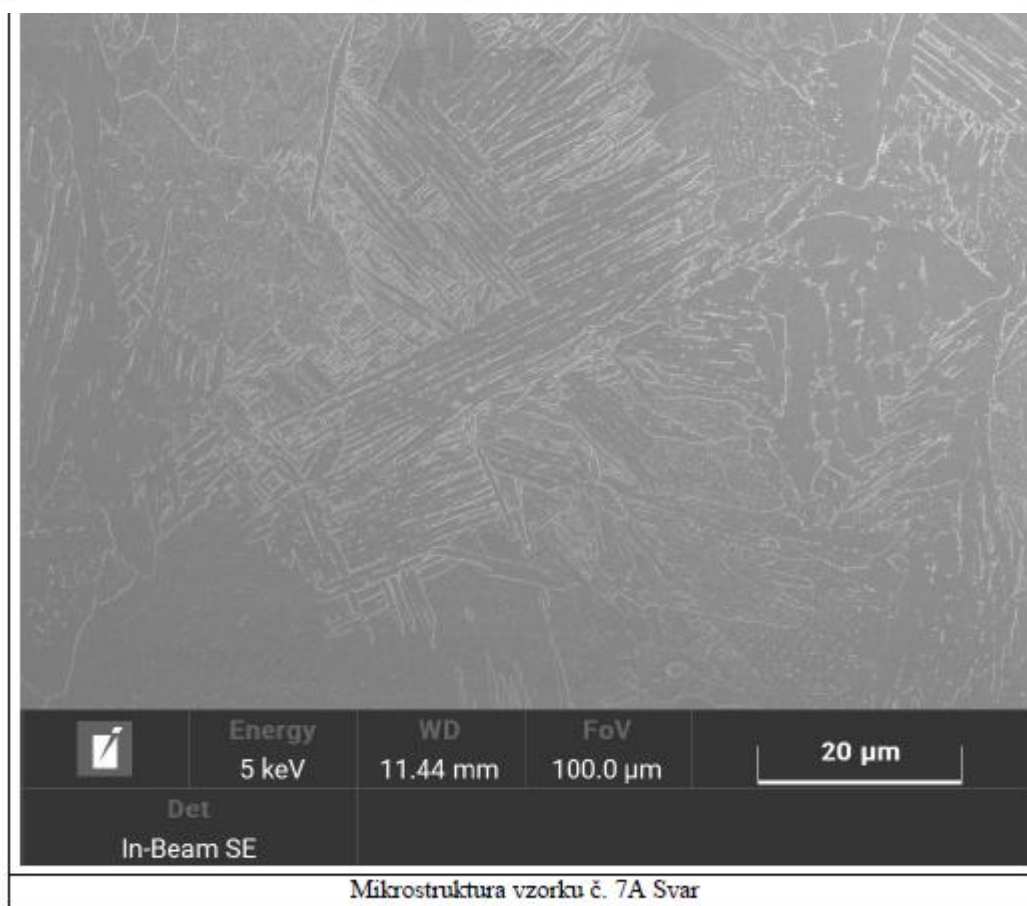
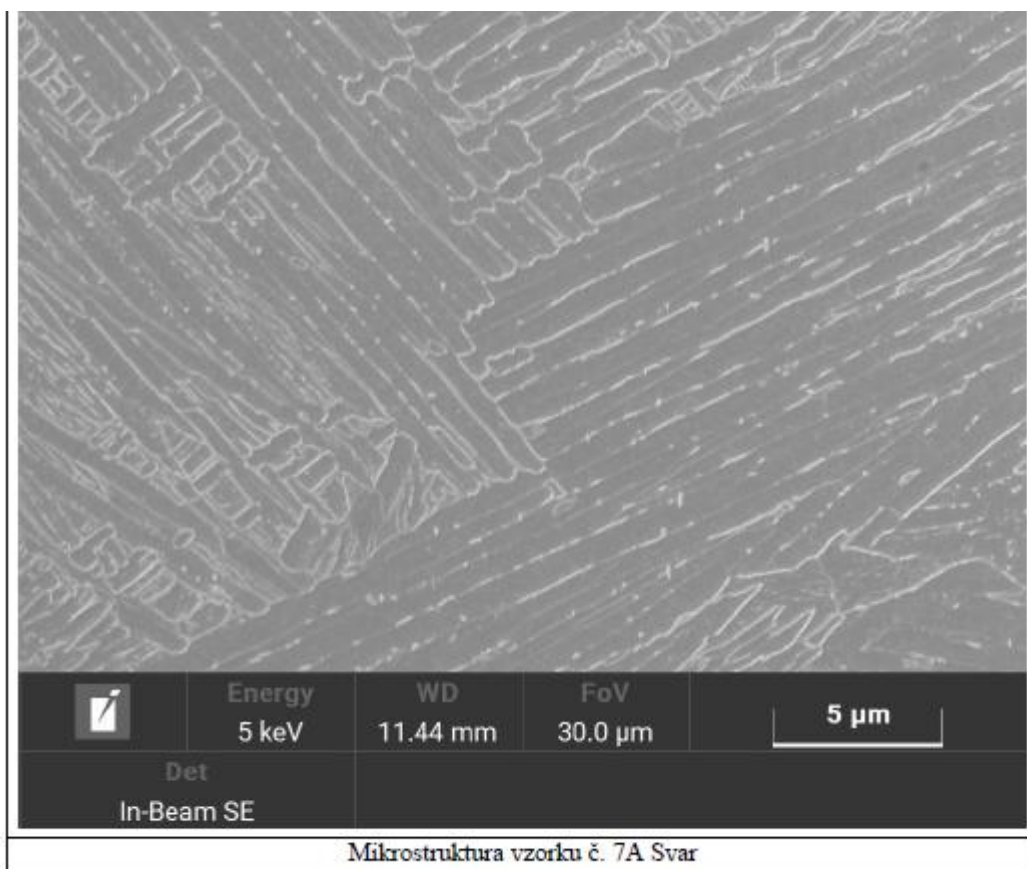
Příloha 3



Příloha 3



Příloha 3



Příloha 3

